

**Universidad Autónoma de Querétaro**

Facultad de Ingeniería.

**Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la detección de daños en estructuras.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta

**I.C. Daniel Arceo Mariñelarena.**

Santiago de Querétaro, Qro. Noviembre 2012



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias Estructuras)

**"DISEÑO DE ALGORITMOS GENÉTICOS (AG) PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS"**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**Presenta:**

I.C. Daniel Arceo Mariñelarena.

**Dirigido por:**

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández. (UAQ)  
Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez. (IMT)

**SINODALES**

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández.  
Presidente

  
Firma

Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez.  
Secretario

  
Firma

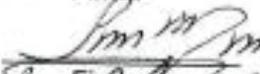
Dr. Moisés Arroyo Contreras.  
Vocal

  
Firma

Dr. Francisco Javier Carrión Virzontes.  
Suplente

  
Firma

Dr. José Luis Reyes Araiza.  
Suplente

  
Firma

  
Dr. Aurelio Domínguez González.  
Director de la Facultad

  
Dr. Irino Torres Pacteco.  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
DICIEMBRE 2012  
México

## RESUMEN.

En este trabajo se presenta el desarrollo y aplicación de los Algoritmos Genéticos (AG) como método de búsqueda para desarrollar una técnica de evaluación no destructiva en estructuras. En este caso se tomara como fundamento la técnica de detección de daño mediante el análisis de la propagación de ondas en la estructuras y se buscara la optimización del mismo, mediante el uso de AG.

Los AG han servido como optimizadores en el diseño de estructuras y componentes estructurales, por lo que es posible utilizar esta metodología para la detección de daño y después a partir de operadores genéticos combinar, cambiar, permutar estos daños hasta encontrar la combinación apropiada que represente una condición estructural con daño.

La evaluación de las respuestas dinámicas de la estructura con daño, pueden ser comparadas con las respuestas dinámicas de la estructura representado con un modelo calibrado de elemento finito y evaluadas a través de la minimización de funciones de error, para el desarrollo de esta investigación se pretende llegar a la solución real del sistema a través de la simulación de escenarios de daño los cuales se adaptan a la condición de la estructura dañada a través de AG, lo que abre la posibilidad de encontrar múltiples daños en una estructura y encontrar una solución exacta.

**Palabras clave:** Algoritmos Genéticos, respuesta dinámica, pruebas no destructivas, optimización, monitoreo estructural.

## SUMMARY.

This thesis presents the development and application of Genetic Algorithms (AG) as a search method to develop a non destructive evaluation for structures. The foundational technique of damage detection using the analysis of wave propagation throughout the structure is used in this case and we try to optimize it, using AG.

The AG have been used as optimizers in the structural and structural component design, this is how it is possible to use this method to detect damage and then, from genetic operators, combine, modify and permute these damages until finding the adequate combination that represents a structural condition with damage.

The evaluation of the dynamic response of the damaged structure can be compared with the dynamic response represented with a calibrated model of a finite element and evaluated minimizing error functions. To develop this investigation we try to get to the real solution of the system using simulation scenarios that adapt to the condition of damaged structure through AG, which opens the possibility of finding multiple damage on a structure and finding an exact solution.

**Key words:** Genetic Algorithms, dynamic response, non destructive tests, optimization, structural health monitoring.

*A los pilares de mi vida,*

***Mis padres.***

## AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a Dios por brindarme el don de la vida, por permitirme gozar de salud y por guiar mis pasos siempre.

A mis padres, Lulú y Tony, por acompañarme y apoyarme en todo momento para cumplir mis metas y sueños.

A mis hermanos, Aarón, Janet y Sofí, y a mis sobrinos, Aarón y Andrea, por llenarme de su amor, que fue el impulso en los momentos de flaqueza.

A mi amigo Joaquín por demostrarme el valor de la amistad y por acompañarme gran parte de mi vida, así como al inicio de este proyecto.

Al Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández por su asesoría y apoyo en este proyecto.

Al Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez por brindarme su confianza, apoyo y conocimientos para la realización de este proyecto. Gracias doctor, es un ejemplo para mí.

Al Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes por su valiosa ayuda y comentarios durante la elaboración del proyecto. Gracias por todo doctor.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por sus programas académicos.

Al Instituto Mexicano del Transporte por el impulso y apoyo para generar investigación de alto nivel en México. Especialmente a todos los que integran la División de Desempeño Vehicular y de Materiales. Así como al Grupo de Monitoreo Estructural, por permitirme seguir desarrollándome como profesionalista.

A la maestra Casiana Urías Hermosillo, al maestro Héctor Suarez Ontiveros, al Lic. Félix Alberto Capilla Pérez y al Fray Jaime Antonio López Alvarado, por apoyarme y compartir sus conocimientos conmigo, son parte fundamental de mi formación, siempre estaré agradecido.

A Ricardo por ser amigo y compañero de este camino.

A mis amigos gracias por brindarme su valiosa amistad, les estaré agradecido toda la vida.

## ÍNDICE.

RESUMEN.....	III
SUMMARY.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS:.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS:.....	X
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.2 HIPÓTESIS.....	8
1.3 OBJETIVOS.....	8
1.3.1 <i>Objetivo General</i> .....	8
1.3.2 <i>Objetivos Particulares</i> .....	8
<b>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
2.1 MONITOREO ESTRUCTURAL.....	9
2.2 MÉTODOS GLOBALES DE DETECCIÓN DE DAÑO.....	11
2.2.1 <i>Métodos globales de detección de daño nivel 1</i> .....	13
2.2.1.1 Criterio de aseguramiento modal (MAC).....	13
2.2.1.2 Factor de escala modal (MSF).....	14
2.2.2 <i>Métodos globales de detección de daño nivel 2</i> .....	14
2.2.2.1 Criterio de aseguramiento modal coordinado (COMAC).....	14
2.2.2.2 Factor coordinado de escala modal (COMSF).....	15
2.2.2.3 Cambio en la forma de los modos dinámicos.....	15
2.2.3 <i>Métodos globales de detección de daño nivel 3</i> .....	16
2.2.3.1 Método de Búsqueda Global (MBG).....	17
2.3 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO (MEF).....	20
2.4 ALGORITMOS UTILIZADOS PARA DETECCIÓN DE DAÑO.....	22
2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG).....	24
2.5.1 <i>Introducción</i> .....	24
2.5.2 <i>Recorrido histórico</i> .....	25
2.5.3 <i>Concepto</i> .....	27
2.5.4 <i>Elementos de los AG y su relación biológica</i> .....	28
2.5.5 <i>Operadores Genéticos</i> .....	31
2.5.6 <i>Ventajas y desventajas de los AG</i> .....	38
2.5.7 <i>Aplicaciones de los AG</i> .....	39
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>41</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA APLICAR LOS AG EN LA DETECCIÓN DE DAÑO EN ESTRUCTURAS.....	41
3.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE DETECCIÓN DE DAÑO.....	42
3.3 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN ERROR PARA EVALUAR DAÑO ESTRUCTURAL.....	45
3.4 DEFINICIÓN DEL INDIVIDUO.....	47
3.5 SELECCIÓN DE OPERADORES GENÉTICOS.....	50

3.6	ALGORITMO GENÉTICO.....	55
<b>CAPÍTULO 4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN (APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN ESTRUCTURAS).....</b>	<b>59</b>
4.1	DETECCIÓN DE DAÑO EN UN ELEMENTO ESTRUCTURAL TIPO BARRA.....	61
4.1.1	<i>Modelo de Elemento Finito de una barra.</i> .....	61
4.1.2	<i>Casos de daño.</i> .....	63
4.1.2.1	Caso 1.....	63
4.1.2.2	Caso 2.....	67
4.1.2.3	Caso 3.....	71
4.1.2.4	Caso 4.....	75
4.1.2.5	Caso 5.....	79
4.1.3	<i>Análisis de resultados.</i> .....	82
4.2	DETECCIÓN DE DAÑO EN UN MARCO ESTRUCTURAL. ....	83
4.2.1	<i>Modelo de Elemento Finito del marco estructural.</i> .....	83
4.2.2	<i>Casos de daño.</i> .....	84
4.2.2.1	Caso 1H. ....	84
4.2.2.2	Caso 2H. ....	87
4.2.3	<i>Análisis de resultados.</i> .....	90
4.3	DETECCIÓN DE DAÑO EN UN PUENTE.....	91
4.3.1	<i>Modelo de Elemento Finito de un puente.</i> .....	91
4.3.2	<i>Casos de daño.</i> .....	94
4.3.2.1	Caso 1.....	94
4.3.2.2	Caso 2.....	97
4.4	CONCLUSIONES. ....	101
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>102</b>	
<b>APENDICE</b> .....	<b>105</b>	
•	ALGORITMO GENÉTICO EN LENGUAJE FORTRAN PARA UNA ESTRUCTURA.....	105
•	ARTICULO PRESENTADO EN EL 8VO. CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA. ....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS:

### FIGURA

2.1 RESPUESTAS DINÁMICAS DE LA ESTRUCTURA ANTES Y DESPUÉS DEL DAÑO.....	18
2.2 CODIFICACIÓN BINARIA Y NO BINARIA DE UN INDIVIDUO.....	30
2.3 OPERADOR DE COMBINACIÓN CON UN SOLO PUNTO DE CRUZA. ....	33
2.4 OPERADOR DE MUTACIÓN.....	34
2.5 OPERADOR DE PERMUTACIÓN PARA UNA CODIFICACIÓN NO BINARIA. ....	35
2.6 CLONACIÓN DE UN INDIVIDUO CON CODIFICACIÓN BINARIA. ....	36
3.1 COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS DE UN CASO FIJO A BUSCAR Y UNA POSIBLE SOLUCIÓN.....	44
3.2 CODIFICACIÓN DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL TIPO VIGA (INDIVIDUO). ....	48
3.3 OPERADOR DE COMBINACIÓN PARA EL CASO DE UN ELEMENTO TIPO VIGA. ....	51
3.4 OPERADOR DE MUTACIÓN PARA EL CASO TIPO VIGA. ....	52
3.5 OPERADOR GENÉTICO DE PERMUTACIÓN PARA UN ELEMENTO TIPO VIGA.....	53
3.6 CLONACIÓN DE UN INDIVIDUO PARA UN CASO TIPO VIGA.....	54
3.7 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO GENÉTICO (PRIMERA FASE).....	57
3.8 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO GENÉTICO (SEGUNDA FASE). ....	58
4.1 DIMENSIONES DE LA BARRA PARA EL CASO EXPERIMENTAL.....	61
4.2 FUERZA UNITARIA DE EXCITACIÓN.....	62
4.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CASO 1.....	63
4.4 MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1 DEL CASO 1. ....	65
4.5 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO 1.....	66
4.6 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CASO2.....	67
4.7 MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1DEL CASO 2. ....	69
4.8 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO 2.....	70
4.9 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CASO3.....	71
4.10 MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1DEL CASO 3. ....	73
4.11 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO 3.....	74
4.12 REPRESENTACIÓN GRAFICA DEL CASO4.....	75
4.13 MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1DEL CASO 4. ....	77
4.14 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO 4.....	78
4.15 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CASO5.....	79
4.16 MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1DEL CASO 5. ....	81
4.17 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO 5.....	82
4.18 DIMENSIONES DEL MARCO ESTRUCTURAL PARA EL CASO EXPERIMENTAL. ....	84
4.19 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CASO 1H.....	84
4.20 MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1 DEL CASO 1H.....	86
4.21 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO 1H. ....	87
4.22 REPRESENTACIÓN GRAFICA DEL CASO 2H.....	87
4.23 MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1 DEL CASO2H. ....	89
4.24 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO2H.....	90
4.25MODELO DE EF DEL PUENTE. ....	91
4.26 FUERZA UNITARIA DE EXCITACIÓN.....	93
4.27 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CASO 1DE DAÑO.....	94
4.29 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO 1.....	97
4.29 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CASO 2 DE DAÑO. ....	97
4.30 GRAFICO DE LA MINIMIZACIÓN ENTRE LAS RESPUESTAS DINÁMICAS EN LA PRUEBA 1 DEL CASO2. ....	100

## ÍNDICE DE TABLAS:

### TABLA

1-1 DIVERSOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETECCIÓN DE DAÑO EN ESTRUCTURAS.....	2
2-1 OBSERVACIONES DE ALGUNOS AUTORES SOBRE LOS OPERADORES GENÉTICOS. ....	37
4-1 PROPIEDADES DEL MATERIAL USADO EN LA BARRA. ....	61
4-2 DAÑOS PARA EL CASO 1 .....	63
4-3 PRUEBA 1- CASO1. ....	64
4-4 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	65
4-5 DAÑOS PARA EL CASO 2 .....	67
4-6 PRUEBA 1- CASO2. ....	68
4-7 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	69
4-8 DAÑOS PARA EL CASO 3. ....	71
4-9 PRUEBA 1- CASO3. ....	72
4-10 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	73
4-11 DAÑOS PARA EL CASO 4 .....	75
4-12 PRUEBA 1- CASO4. ....	76
4-13 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	77
4-14 DAÑOS PARA EL CASO 5 .....	79
4-15 PRUEBA 1- CASO5. ....	80
4-16 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	81
4-17 PROPIEDADES DEL MATERIAL USADO PARA EL MARCO ESTRUCTURAL. ....	84
4-18 DAÑOS PARA EL CASO 1H.....	85
4-19 PRUEBA 1- CASO1. ....	85
4-20 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	86
4-21 DAÑOS PARA EL CASO2H .....	88
4-22 PRUEBA 1- CASO2H.....	88
4-23 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	89
4-24 PROPIEDADES DEL MATERIAL USADO EN EL MODELO DEL PUENTE.....	92
4-25 DAÑO PARA EL CASO 1.....	94
4-26 PRUEBA 1- CASO1. ....	95
4-27 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	96
4-28 DAÑO PARA EL CASO 2.....	98
4-29 PRUEBA 1- CASO2. ....	98
4-30 DAÑOS DEL MEJOR INDIVIDUO DE LA PRUEBA 1.....	99

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

A nivel mundial, el monitoreo remoto y continuo se está empleando cada vez más para la detección y evaluación de daño en estructuras, que, por su importancia justifican el empleo de estos sistemas (Achenbach, 2008). En general, el monitoreo de la condición de una estructura se define como “la medida de las condiciones de operación y de carga, y de las respuestas críticas de una estructura para dar seguimiento y evaluar síntomas anormales de operación y o deterioro o daño que afecten el servicio, seguridad o confiabilidad de la misma” (Aktan & Grimmelman, 1999).

El monitoreo y evaluación estructural hoy en día es posible y es una alternativa para optimizar la aplicación de los recursos financieros de la conservación de la infraestructura de un país. Una de las problemáticas en países desarrollados estriba en la cantidad de puentes que conforman la red de carreteras, los cuales necesitan ser evaluados periódicamente debido a dos factores fundamentales: el tiempo de servicio de los puentes, y el incremento en el flujo vehicular. En México, esta problemática no es la excepción, aun cuando varios de los puentes con más de 30 años de servicio fueron diseñados con factores de seguridad elevados (Carrión, 2002). No obstante, es necesario determinar la vida útil de las estructuras, conocer su índice de desempeño, realizar programas de mantenimiento preventivo y elaborar planes de restricción de tráfico en caso de daño repentino ocasionado por accidentes o condiciones climáticas extremas. El contar con sistemas de monitoreo y evaluación estructural constante tiene tres ventajas: la primera de ellas es que la vida útil de las estructuras se puede incrementar si se siguen los planes de mantenimiento preventivo derivados de la evaluación estructural; la segunda es que el costo de una póliza de seguro puede bajar cuando se tienen sistemas de monitoreo y evaluación; y tercera, la más importante, se incrementa los índices de seguridad para los usuarios.

En los últimos 30 años se han incrementado los trabajos de investigación para encontrar procedimientos y métodos efectivos para la detección de daño en estructuras civiles, aeronáuticas, mecánicas. En la Tabla 1-1 se presentan algunos de los métodos para la detección de daño:

*Tabla 1-1 Diversos métodos utilizados para detección de daño en estructuras.*

<b>MÉTODO</b>	<b>AUTORES</b>
Métodos globales por vibraciones mecánicas y propagación de ondas.	(Carrión, 2002)
Cambio en las frecuencias naturales y modos de vibrar	(Kato & Shimada, 1986)
Cambios en las propiedades modales	(Kato & Shimada, 1986); (Turner & Pretolve, 1988); (Allampalli, et al., 1995)
Índices de daño a través de los modos de vibrar y sus derivados como el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC)	(Allemang & Brown, 1982)
El Factor de escala modal (MSF)	(Ewins, 2000)
Criterio desplazamiento-frecuencia	(Bert, 1993)
Criterios basados en la energía de deformación	(Linag & Lee, 1994)
Criterio de Aseguramiento Modal Coordinado	(Abdel Wahab & De Roeck, 1999); (Salawu, 1997); (Saitoh & Takei, 1996)
Cambios de la curvatura modal (MSC)	(Pandey, et al., 1991)
Cambios en las matriz de rigidez a partir de las formas modales	(Zimmerman & Kauk, 1994)
Método por subdominio inverso	(Carrión, et al., 2003)
Detección de daño por propagación de ondas	(Quintana, 2004)

La idea básica de estos métodos es evaluar los posibles cambios en los parámetros dinámicos (frecuencias, modos de vibrar, amortiguamiento modal) y correlacionarlos con cambios en los parámetros estructurales especialmente en las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, que son definidos a través de un modelo matemático que se usa para simular el sistema real.

En todos los métodos de detección de daño, una parte fundamental es la calibración del modelo matemático que represente las propiedades dinámicas y estáticas de las estructuras en estudio, así como su respuesta ante excitaciones externas (respuesta dinámica). Una inadecuada representación de los fenómenos físicos conllevará al fracaso de cualquiera de los métodos empleados.

Como resultado de la investigación desarrollada, hoy en día el costo, tamaño y peso de los sensores ha disminuido, lo que permite pensar en estructuras instrumentadas con miles de diferentes tipo de sensores (Aktan, et al., 1998) tales como: Acelerómetros, inclinómetros, sismógrafos, medidores de deformación, estaciones meteorológicas, cámaras de video, velocímetros, etc. Inclusive, los recientes conceptos de actuadores permitan disminuir la vibración o controlar frecuencias que induzcan resonancia a la estructura o componente estructural (Fuhr, et al., 1992); (Inman, 2001); (Carrión, et al., 2007).

La evaluación de daño en estructuras mediante respuestas dinámicas ha recibido gran atención por sus aplicaciones prácticas (Doebling, et al., 1996) y se han dividido en cuatro niveles de identificación de daño (Carden & Fanning, 2004):

- i) Detección de existencia de daño.
- ii) Determinación de su ubicación.
- iii) Cuantificación de la severidad del daño.
- iv) Predicción de la vida útil de servicio de la estructura.

Los avances en informática y tecnologías de comunicación hacen posible la formación de Sistemas Integrales de Administración de Puentes (Aktan & Grimmelman, 1999), en donde todos los datos, incluyendo los del monitoreo estructural del puente y el tráfico, así como los modelos paramétricos pueden ser almacenados, procesados y analizados para la toma de decisiones y administración de recursos financieros de una red federal de carreteras.

Dentro de las técnicas de evaluación de daño, el análisis de la propagación de ondas en la estructura es un método que permite conocer el daño a partir de los cambios en la propagación de las ondas transmitidas y reflejadas sobre la estructura (Doyle, 1997) (Doyle, 2004). Como se ha podido observar existen varios métodos para la detección de daño, uno de ellos es el Método de Búsqueda Global (MBG), el cual se basa en un algoritmo de búsqueda de cambios en los parámetros estructurales que optimiza una función de objetivo. Así, cuando hay daño en la estructura, se presenta un cambio entre las respuestas dinámicas de la misma, respecto a la condición sin daño. Como metodología de detección, este enfoque tiene una limitante y es el hecho de que se requiere una referencia de la condición actual de la estructura (antes del daño). Una alternativa para dar mayor flexibilidad al método, es reemplazar la información de la estructura original con un modelo de elemento finito calibrado (Quintana, 2004) (Doyle, 2004) a través de pruebas dinámicas sobre la estructura.

La búsqueda que realizan los métodos globales para la detección de daño se basa en un algoritmo que busca cambios en los parámetros estructurales que minimiza una función objetivo. En gran parte, la metodología de búsqueda de los algoritmos empleados es lineal, es decir, ejecutan una revisión ordenada y secuencial elemento por elemento, lo cual dependiendo de la estructura a analizar puede consumir mucho tiempo computacional y en su caso, tardar en converger. Una opción para la optimización de dichos métodos, es el crear un nuevo método de búsqueda de daño implementando un algoritmo genético (AG), el cual, realiza una búsqueda no lineal y por consiguiente tendrá una convergencia aceptable en un menor tiempo.

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos de optimización basados en los mecanismos de selección y genética natural. Combinan la supervivencia de los más compatibles entre las estructuras de cadenas, mediante un procesamiento aleatorio de la información genética de cada individuo, intercambiando dicha información para construir un algoritmo de búsqueda con algunas de las capacidades de innovación de la búsqueda humana (Goldberg, 1989). El poder de los AG se logra por la diversidad de los individuos de una población que evolucionan, en paralelo, siguiendo el principio de "la supervivencia del más apto". La diversidad de los

individuos se obtiene y se mantiene con el operador de cruce y la mutación genética que permiten encontrar mejores soluciones y evitan la convergencia prematura a un máximo local (Holland, 1992).

Los AG han sido aplicados para desarrollar complejas tareas de optimización en varias aplicaciones prácticas. En particular, para la detección de daños en estructuras, varias propuestas han sido presentadas en la última década en un intento para diseñar un procedimiento eficaz para la detección de daños (Borges, et al., 2006) (Meruane & Heylen, 2010) (Waisman, et al., 2009) (Kouchmeshky, et al., 2006) (Casciati, 2008) (Kouchmeshky, et al., 2007). Estas estrategias por lo general presentan variaciones en los escenarios de daño por lo que es necesario un AG como optimizador del procedimiento de búsqueda de daño (Goldberg, 1989) (Holland, 1992).

Es posible utilizar esta metodología en el MBG para la detección de daño en estructuras a través de la generación, en un inicio aleatoria, de casos hipotéticos de daño y después a partir de AG combinar, cambiar, permutar estos daños hasta encontrar la combinación apropiada que represente una condición estructural con daño. La evaluación de las respuestas dinámicas de la estructura con daño pueden ser comparadas con las respuestas dinámicas de la estructura representado con un modelo calibrado de elemento finito y evaluadas a través de la minimización de funciones de error. Para el desarrollo de esta investigación se pretende llegar a una solución cercana a la real del sistema a través de la simulación de escenarios de daño los cuales se adaptan a la condición de la estructura dañada a través de un AG, lo que abre la posibilidad de encontrar múltiples daños en una estructura y encontrar una solución aceptable.

## 1.1 Justificación.

En la actualidad los puentes son de vital importancia para los países, el traslado de personas y mercancías, a los centros de producción económica y centros de consumo. México cuenta con una extensa red de transportes aéreos, marítimos y terrestres. Esta última, está formada por la red nacional de carreteras. Por lo tanto conservar el buen estado del funcionamiento vial es de suma importancia, ya que permite alcanzar los objetivos fijados en los

planes de desarrollo y que se traduce en elevar la calidad de vida de los habitantes.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha implementado el programa Sistema de Puentes Mexicanos (SIPUMEX), el cual es un sistema integral para la administración de puentes de la red federal de carreteras. Para la planificación de la conservación de la infraestructura federal técnicos especializados realizan periódicamente inspecciones visuales y de acuerdo con el estado en que se encuentren los puentes dan una calificación. De estas inspecciones, se pueden derivar inspecciones especiales según los daños estructurales observados en los mismos. Una vez calificados los puentes, se establece un programa de mantenimiento de acuerdo al nivel de deterioro determinado en las inspecciones.

Cabe mencionar que la antigüedad promedio de los siete mil doscientos puentes, que conforman la red federal carretera, sobrepasa los treinta y nueve años, y no solo esto, sino que un gran número de los puentes están ubicados en zonas de alto riesgo ambiental que justifican el monitoreo permanente, particularmente por los cambios climáticos, caída de lluvias torrenciales y huracanes que cada vez son más severos (Quintana, 2009).

Debido a la gran inversión económica, tiempo de construcción, avances tecnológicos e importancia de los puentes de gran envergadura en México, es necesario contar con monitoreo constante de dichas estructuras. Como son los puentes Mezcala, El Carrizo, Baluarte, Quetzalapa, Dovalí Jaime, Infiernillo II, San Cristóbal y los puentes antes mencionados Río Papaloapan, Chiapas y Tampico.

Tomando en cuenta los avances tecnológicos que se han desarrollado hoy en día para determinar el daño en estructuras, se ha observado que las inspecciones visuales no siempre son tan confiables en la detección de daño, ya que hay riesgos que no se pueden detectar a través de este tipo de inspección. Sin descartar la importancia de las inspecciones visuales se ha buscado mejorar y actualizar los métodos de inspección, desarrollando el complemento que permita

obtener la información del desempeño de los puentes en tiempo real y de esta manera prevenir, o en su caso, dar soluciones de manera inmediata a los problemas que se presenten.

Se ha buscado dar solución a estas necesidades, estableciendo un Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI), en el cual la información de cada uno de los puentes instrumentados pueda ser recibida, analizada y procesada. El Centro de Monitoreo se está estructurando y desarrollando en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), para así tener en constante inspección los puentes más importantes de la red federal carretera o los que requieran estar monitoreados por necesidades específicas.

El CMPEI requiere de metodologías de inspección, detección, evaluación de daño y confiabilidad estructural para cumplir con su propósito.

Desarrollar un método de detección de daño implementando los AG será una herramienta útil para la optimización de la evaluación y detección de daño que se realiza en el CMPEI del IMT, se utilizara la metodología de los AG ya que sus procedimientos de optimización pueden ser aplicables a la búsqueda de daño en estructuras, debido a que su optimización y búsqueda es no lineal, lo que permite una convergencia aceptable en menor tiempo y al aplicar los operadores genéticos se minimiza las posibilidades de centrar la búsqueda en mínimos locales, es decir, se reduce la probabilidad de caer en posibles soluciones falsas. Los AG han tenido un gran desarrollo en las últimas décadas y se ha podido observar que son un método de optimización adaptable a distintos problemas prácticos de ingeniería, obteniendo soluciones aceptables para dichos problemas.

## 1.2 Hipótesis.

Es posible utilizar las respuestas dinámicas de un sistema, una función de error y los Algoritmos Genéticos (AG) para identificar cambios en los parámetros estructurales y, en base a dichos cambios, determinar condiciones de daño estructural con las que estén relacionados estos cambios. De manera inicial se pueden generar los casos hipotéticos de daños de forma aleatoria, y con los AG como operadores de búsqueda, se puede encontrar las combinaciones apropiadas que representen una condición estructural con daño utilizando un modelo de elemento finito calibrado de la estructura. Esto permitirá encontrar múltiples casos de daños en una estructura y encontrar una solución aceptable.

## 1.3 Objetivos.

### 1.3.1 Objetivo General.

Desarrollar un algoritmo genético que permita optimizar y agilizar la detección de daño en estructuras utilizando la metodología del Método de Búsqueda Global (MBG), a través de la minimización de una función de error entre las respuestas dinámicas con daño del sistema con las generadas a través de cambios en los parámetros estructurales en un modelo de elemento finito de la estructura.

### 1.3.2 Objetivos Particulares.

- a) Determinar los operadores necesarios (cruce, mutación, selección o reproducción) con los que los Algoritmos Genéticos son óptimos para la detección de daño en estructuras.
- b) Cuantificar la variación asociada a un cambio en los parámetros estructurales mediante la función de mínimos cuadrados.
- c) Encontrar el Algoritmo Genético óptimo para encontrar daño puntual y generalizado en estructuras.

## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.

### 2.1 Monitoreo Estructural.

El monitoreo de la salud estructural o integridad estructural (Structural Health Monitoring, SHM) es un sistema que combina la obtención de datos de una estructura con el análisis de la misma. Esta información puede ser periódica o en tiempo real. Dependiendo de los datos obtenidos, pueden estar asociados a cambios diversos como: degradación de los materiales, deterioro, corrosión, fatiga, reacciones químicas, humedad, cambios en las variables del ambiente, así como a las propiedades físicas relativas a las condiciones de carga, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, aceleraciones, agrietamiento, vibraciones y factores que sean necesarios para la evaluación operacional de la estructura (Achenbach, 2008).

El campo del monitoreo estructural es amplio y se desarrolla y aplica con intensidad en las ingenierías aeronáutica, civil y mecánica, principalmente, aunque también hay avances en otras como en la eléctrica y la electrónica, por ejemplo (Achenbach, 2008). En el campo de la ingeniería civil ya se aplica a estructuras de gran importancia para poder detectar y prevenir la insuficiencia de capacidad estructural, como: puentes, edificios, estadios, presas, túneles, monumentos históricos e infraestructura vital para el bienestar social.

Un sistema de SHM utiliza las técnicas o pruebas no destructivas para proporcionar información continua (o bajo demanda) sobre el estado de una estructura, de modo que una evaluación de la integridad estructural se puede hacer en cualquier momento, y las medidas correctivas se pueden tomar cuando sean necesarias. Un gran número de sensores forma el extremo frontal de un sistema SHM para proporcionar información sobre el estado de la estructura. La información de los sensores se incorpora en los análisis estructurales y modelos matemáticos para evaluar el estado de la estructura y para predecir su vida útil. Así, el concepto subyacente se basa en la detección y caracterización de los daños y evaluar las condiciones operacionales de la estructura (Achenbach, 2008).

El desarrollo de un sistema de monitoreo a largo plazo para una estructura es realmente capaz de proporcionar información para evaluar la integridad estructural, durabilidad y fiabilidad en todo el ciclo de vida de la estructura y asegurar el mantenimiento óptimo, planificación y operación de la misma. Si el monitoreo funciona bien, adquiere sentido la expresión: mantenimiento a tiempo (Ko & Ni, 2005).

El daño es la pérdida de funcionalidad de un sistema y se puede definir como el conjunto de cambios introducidos en un sistema que afectan adversamente su funcionamiento actual o futuro (Hernández, 2010).

Implícitamente en la definición anterior, es notorio que el daño no tiene significado alguno sin una comparación entre dos diferentes estados del sistema, donde el primero es asumido como la representación inicial o sin daño del sistema (Pérez, 2011).

Los daños en una estructura pueden presentarse debido a cargas excesivas que sobrepasan los límites de carga para la cual la estructura fue diseñada; por el deterioro de los materiales teniendo una disminución en sus propiedades físicas y mecánicas; o por condiciones del medio ambiente: sismos, desbordamiento de ríos, huracanes, etc. (Pérez, 2011).

Los actuales métodos de detección de daño son métodos visuales o experimentales (técnicas locales) tales como métodos acústicos o ultrasónicos, métodos de campo magnético, radiografías, líquidos penetrantes, corrientes parasitas o corrientes Eddy, métodos térmicos, etc. Todas estas técnicas experimentales requieren que la zona donde se presenta el daño sea conocida *a priori* y que la parte de la estructura que será inspeccionada sea de fácil acceso. Sujetos a esas limitaciones, tales métodos experimentales pueden detectar daños en la superficie de la estructura o en las zonas cercanas a ésta. La necesidad por desarrollar métodos cuantitativos para la detección de daño global que puedan ser utilizados en estructuras complejas ha llevado a una continua investigación de métodos basados en los cambios en las características vibracionales de la estructura (técnicas globales). La premisa básica de los métodos de

identificación de daño basados en cambios en las características vibracionales es que el daño modifica significativamente la rigidez, la masa, el amortiguamiento o las propiedades de disipación de energía del sistema, las cuales a su vez, modifican la respuesta dinámica del sistema. Generalmente, estos métodos de identificación, comparan las propiedades dinámicas o la respuesta estructural del modelo dañado con las propiedades o la respuesta del modelo sin daño, para obtener la información necesaria o los parámetros que permitan localizar y cuantificar el daño. El hecho de que se tenga un carácter global, implica que la estructura y que la información que se obtiene de esta, únicamente tiene sentido si se analiza en su conjunto (Pérez, 2011). A continuación se presenta una descripción de algunos métodos de detección de daño:

## 2.2 Métodos globales de detección de daño.

Como se mencionó los métodos utilizados para la evaluación e identificación de daño en estructuras se clasifican en dos: locales y globales. Como se pudo observar en los puntos anteriores una característica de los métodos locales, es el conocimiento a priori las características del material constitutivo de la estructura, la accesibilidad a la zona en específico que se desea inspeccionar y, evidentemente, la cobertura limitada (con respecto a toda la estructura) de la inspección. Lo cual puede llegar a limitar la inspección.

Los métodos globales, son técnicas que proporcionan información sobre la condición general de una estructura, sin que necesariamente determinen o localicen el daño, pero son capaces de proporcionar una calificación global del comportamiento de la misma. El hecho de que estos métodos tengan un carácter global, implica que la instrumentación que utilizan para sus mediciones, sea distribuida por toda la estructura y que la información que se obtiene de ésta, únicamente tiene sentido si se analiza en su conjunto. Ejemplos de los métodos globales son las mediciones dinámicas: de vibraciones o de propagación de ondas flexionantes (Carrión, 2002).

Básicamente la idea de la evaluación estructural utilizando mediciones dinámicas, se fundamenta en la interpretación de las variaciones en los parámetros modales como son las frecuencias, las formas modales y los factores de amortiguamiento que, a su vez, son manifestación de algún cambio en una variable física de la estructura, como puede ser la masa, la rigidez o el amortiguamiento. En un principio, la evolución de daño a través de este tipo de análisis, se realizaba en forma cuantitativa buscando establecer correlaciones empíricas entre los valores medidos y los niveles de daño conocidos. Como resultado, se obtuvieron factores de correlación muy bajos por los diferentes grados de sensibilidad que los parámetros modales tienen con respecto a la magnitud y localización de daño. Motivado por este último, se iniciaron estudios para establecer modelos de análisis que a partir de la información modal pudiera cuantificar y ubicar el daño (Carrión, 2002).

Un sistema de clasificación para estos métodos de detección de daño establece cuatro niveles de acuerdo con el alcance de la detección (Rytter, 1993):

- **Nivel 1:** Determinación de la existencia de daño en la estructura.
- **Nivel 2:** Localización geométrica del daño.
- **Nivel 3:** Cuantificación de la severidad del daño.
- **Nivel 4:** Predicción del comportamiento futuro y de la vida útil bajo las condiciones actuales de operación.

Cada método para ser clasificado con un nivel superior debe de cumplir con los niveles subsecuentes. Hasta el día de hoy, todos los métodos que se basan en la medición de vibraciones para la detección de daño, puede proporcionar información de nivel 1 o 2. Cuando el análisis se complementa con el análisis de simulación de un modelo estructural, es posible llegar a una identificación de nivel 3 (Carrión, 2002). El nivel 4, además de utilizar modelos estructurales, está asociado con modelos de mecánica de la fractura, de análisis de fatiga, para obtener una predicción de la vida residual de la estructura.

A continuación se mencionara algunos de los métodos de detección de daño más usados. Se presentaran métodos de los Niveles 1, 2 y 3, ya que en este trabajo se presenta un Algoritmo Genético para la detección de daño nivel 3.

### 2.2.1 Métodos globales de detección de daño nivel 1.

Estos métodos buscan calcular de manera inmediata un índice que identifique el daño en una estructura sin ubicarlo ni cuantificarlo. Se consideran fundamentalmente los índices basados en el cambio en las frecuencias naturales, el criterio de aseguramiento modal (MAC) y el factor de escala modal (MSF), entre los más importantes.

#### 2.2.1.1 Criterio de aseguramiento modal (MAC).

En un intento por definir un índice para la evaluación estructural, se desarrolló el criterio de aseguramiento modal (MAC, por sus siglas en ingles), estableciendo para cada valor característico una medida de la correlación de los vectores característicos (formas modales) entre la condición dañada (D) y la no dañada (0) (Allemang & Brown, 1982). Esta dado por la siguiente ecuación:

$$MAC_i = \frac{|\{\varphi_0\}_i^T \{\varphi_D\}_i|^2}{|\{\varphi_0\}_i| |\{\varphi_D\}_i|} \quad (2.1)$$

El subíndice  $i$ , se refiere al  $i$ -esimo modo y los vectores  $\{\varphi_0\}_i$  y  $\{\varphi_D\}_i$ , son los vectores característicos sin daño y con daño, respectivamente. Los valores obtenidos por este criterio son entre cero y uno, donde el valor de 1.0 representa una correlación total entre modos, es decir, no existe daño.

### **2.2.1.2 Factor de escala modal (MSF).**

El factor de escala modal (MSF, por sus siglas en inglés) es otra forma de cuantificar el daño y representa la medida de la pendiente de la recta que mejor ajusta la relación entre los coeficientes de los vectores modales de la condición dañada contra la condición sin daño (Ewins, 2000). El intervalo de valores de este factor van de cero a infinito, que corresponde a ángulos que van de 0 a 90 grados. Un valor de 1.0, significa que hay una correlación total entre la condición con daño y la condición sin daño, por lo que no existe diferencia en los parámetros y, por lo tanto, no existe daño (Carrión, 2002).

## **2.2.2 Métodos globales de detección de daño nivel 2.**

Los métodos nivel 2, se basan en un análisis modal más completo, con una mayor instrumentación y utilizan varios valores y vectores característicos en forma simultánea. El principio básico de estas técnicas, es asociar la ubicación geométrica o física del daño con las coordenadas del vector característico que presenta una mayor variación (Carrión, 2002).

Los métodos más utilizados para este caso, son el Criterio de Aseguramiento Modal Coordinado (COMAC), el Factor Coordinado de Escala Modal (COMSF), el análisis en el cambio de las formas modales y el análisis en el cambio en la curvatura de los modos. A continuación se describen algunos de ellos.

### **2.2.2.1 Criterio de aseguramiento modal coordinado (COMAC).**

El COMAC, es un criterio en el que cada nodo se correlaciona linealmente a la condición dañada con la inicial o sin daño (Lieven & Ewins, 1988). Para cada punto o nodo, se tiene un criterio de aseguramiento modal que puede tener valores entre cero y uno. De igual forma que el MAC, este criterio tiene valores de 1.0 cuando existe una correlación total, es decir, cuando no

está dañada la estructura. En términos generales, este criterio identifica las variaciones más grandes que se presentan en los vectores característicos y asocia la localización del daño con las coordenadas del punto en el que se presentan dichas variaciones. Este criterio se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$COMAC_j = \frac{\sum_{i=1}^N |\{\varphi_0\}_i^j \{\varphi_D\}_i^j|^2}{\sum_{i=1}^N |\{\varphi_0\}_i^j|^2 \sum_{i=1}^N |\{\varphi_D\}_i^j|^2} \quad (2.2)$$

Donde  $\{\varphi\}_i^j$  es el desplazamiento en el j-esimo punto del i-esimo modo, para las condiciones iniciales  $\{\varphi_0\}$  con daño  $\{\varphi_D\}$  (Carrión, 2002).

#### 2.2.2.2 Factor coordinado de escala modal (COMSF).

El método COMSF cuantifica en un punto determinado el grado de diferencia que hay en la medida de un parámetro modal con daño, respecto a la condición sin daño (Ewins, 2000). La expresión de este factor se calcula de la misma forma que el Factor de Escala Modal (MSF), pero asociando las coordenadas del punto analizando con la ubicación física del daño (COMSF(j)); por lo tanto; se tendrá un factor de escala modal para cada nodo (Carrión, 2002).

#### 2.2.2.3 Cambio en la forma de los modos dinámicos.

Al analizar los cambios en la forma de los modos dinámicos (Salawu & Williams, 1992), se puede observar, mediante una comparación grafica de los modos sin daño y con daño, la localización aproximada del elemento dañado. Para la calificación del nivel del daño existen varios esquemas para definir un índice, pero la forma más directa es dada por la diferencia relativa de cambio {RD} (Fox, 1989), definida por la siguiente ecuación:

$$\{RD\}_i^j = \frac{\{\varphi_0\}_i^j - \{\varphi_D\}_i^j}{\{\varphi_0\}_i^j} \quad (2.3)$$

Donde  $\{\varphi_0\}_i^j$  es la forma normalizada del i-esimo modo dinámico en el j-esimo punto (o grado de libertad) de la estructura sin daño y  $\{\varphi_D\}_i^j$  es la forma normalizada de i-esimo modo dinámico en el j-esimo punto de la estructura con daño. En general el método se basa en el hecho de que las máximas diferencias se presentan en las zonas de los nodos en donde existe daño. De esta manera, una gráfica de esta diferencia relativa de los valores medidos en cada posición, mostrara la tendencia de variación significativa en estos nodos (Carrión, 2002).

### 2.2.3 Métodos globales de detección de daño nivel 3.

Desde un punto de vista de instrumentación, experimentación, procesamiento de datos y análisis, se puede decir que los métodos utilizados para una evaluación nivel 3 son complejos. Como regla general este nivel necesita de un análisis modal mucho más completo que pueda identificar el máximo de vectores y valores característicos. Como consecuencia, el número de instrumentos de medición debe ser mayor, la cantidad de datos medidos experimentalmente es igualmente grande y el procesamiento de toda esta información resulta la laboriosa y compleja. El análisis, para que pueda proporcionar una evaluación del daño, debe hacerse utilizando un modelo estructural, típicamente de elementos finitos (EF), que se haya calibrado a la condición sin daño. Posteriormente, el análisis se realiza con algún tipo de cálculo numérico cuyo objetivo es ajustar los parámetros estructurales (masa, rigidez o amortiguamiento) del modelo de referencia para reproducir los datos experimentales medidos. A partir de los resultados de este ajuste, se asocia el daño con su localización y su severidad (Carrión, 2002).

Los métodos que se utilizan para actualizar los valores de los parámetros estructurales utilizan una función de optimización o función objetivo con restricciones basada en las ecuaciones de movimiento que representa a la estructura. Por lo general, el proceso sigue los siguientes pasos:

1. Definición de la función objetivo que se va a minimizar.
2. Establecimiento de las restricciones del problema
3. Implementación del esquema numérico de optimización.

Existen formulaciones diferentes basadas en modelos físicos que son utilizadas como funciones objetivo o restricciones que dependen del algoritmo utilizado para la actualización de los parámetros estructurales (Carrión, 2002). Algunos de los métodos clasificados en este nivel son: El Método Inverso por Sub-Dominios (MISD) (Carrión, 2002), el Método de Búsqueda Global (MBG), entre otros.

### 2.2.3.1 Método de Búsqueda Global (MBG).

Dentro de las técnicas de evaluación de daño, el análisis de la propagación de ondas en la estructura, es un método que permite conocer el daño a partir de los cambios en la propagación de las ondas transmitidas y reflejadas sobre la estructura (Doyle, 1997) (Doyle, 2004).

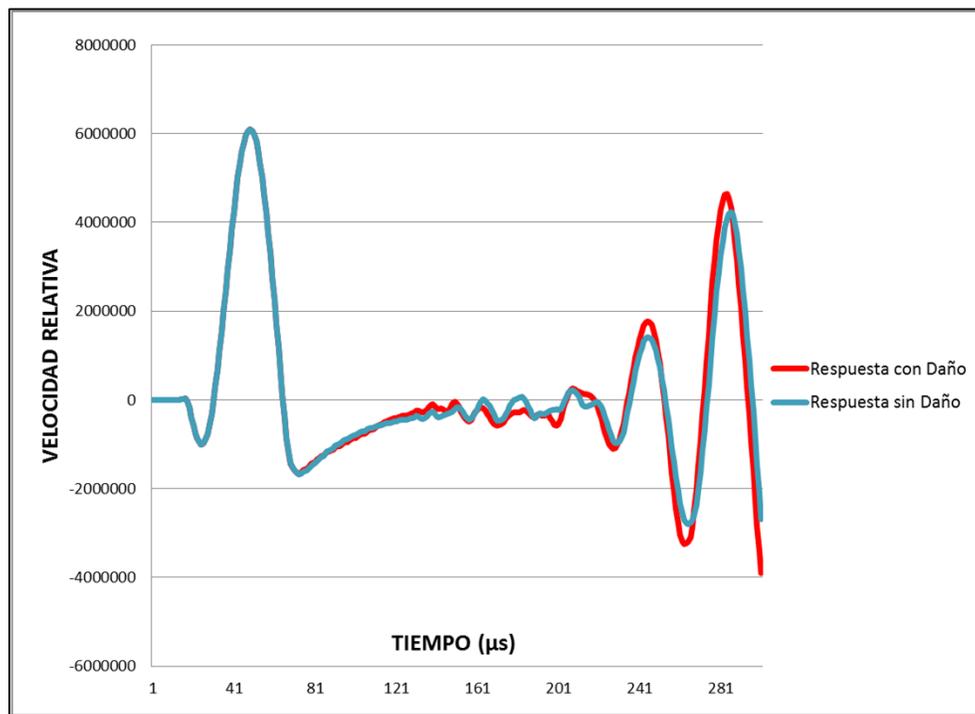
En los últimos años se desarrolló el Método de Búsqueda Global (MBG) para detección y evaluación de daño, fundamentado en el análisis de propagación de ondas. Este método se basa en un algoritmo de búsqueda de cambios en los parámetros estructurales que minimiza una función de mínimos cuadrados (ecuación 2.5).

$$V_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (r_{i,j,daño} - r_{i,j,ind})^2}{N}} \quad (2.5)$$

Mediante esta la ecuación 2.5 se obtiene de la diferencia entre la respuesta dinámica experimental en el nodo  $j$   $\{r_{daño}\}_j$  y la respuesta del individuo analizado en ese mismo nodo  $j$   $\{r_{ind}\}_j$ . En este caso, el vector de respuestas  $\{r\}_j$  puede estar definido por los desplazamientos  $\{u\}$ , las velocidades  $\{\dot{u}\}$  o las aceleraciones  $\{\ddot{u}\}$ , según el tipo de sensor que se utilice. Si no hay

diferencia entre ambas respuestas, significa que los parámetros estructurales utilizados en el modelo del individuo corresponden con los del caso fijo. El término  $r_i$  representa la respuesta dinámica en el nodo  $j$  al tiempo  $i$  y  $N$  es el número de datos en el que dicha respuesta es discretizada en el tiempo (Quintana, 2009).

De manera muy objetiva, cuando hay daño, existe un cambio entre las respuestas dinámicas de la estructura, respecto a la condición sin daño (Figura 2.1). Como metodología de detección, este enfoque tiene una limitante y es el hecho de que se requiere una referencia de la condición actual de la estructura (antes del daño). Una alternativa para dar mayor flexibilidad al método, es remplazar la información de la estructura original con un modelo de elemento finito calibrado (Quintana, 2004) (Doyle, 2004) a través de pruebas dinámicas sobre la estructura.



*Figura 2.1 Respuestas dinámicas de la estructura antes y después del daño.*

El Método de Búsqueda Global se enfoca al problema de localización de daño mediante

la identificación de cambios en los parámetros estructurales a partir de la propagación de ondas de alta frecuencia en la estructura. La base de este método radica en tres módulos básicos, la primera la existencia de un modelo estructural de Elemento Finito (EF) previamente calibrado que represente el comportamiento dinámico de la estructura en su condición de referencia o “sin daño”; la segunda, la parte experimental, cuyo objetivo es obtener la respuesta dinámica de la estructura ante una excitación de la misma en puntos específicos de interés, es decir, recolectar las ondas de propagación que pasan en un punto de la estructura; y la tercera, un algoritmo que almacena, compara, evalúa las respuestas dinámicas experimentales con las generadas por el modelo de elemento finito de la estructura (Quintana, 2009).

Las ondas que se propagan ante la excitación de la estructura son transmitidas, reflejadas y atenuadas, por la interacción de los diferentes materiales en la estructura, por cambios en la geometría en el medio de propagación, por las condiciones de frontera, etc. (Doyle, 1997). Estas propiedades de las ondas flexionantes se utilizan para la detección y ubicación de daño; si se parte de una estructura sin daño, las ondas registradas tendrán un patrón de propagación acorde a las propiedades mecánicas de los materiales y su geometría en la estructura, cuando existe un daño, una alteración en las propiedades o geometría de la estructura el patrón de propagación cambia, haciendo posible la detección de daño, asumiendo el daño como un cambio en los parámetros estructurales (Quintana, 2009).

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

aplicación del MBG, para la calibración de un modelo, sólo se consideran los parámetros estructurales directos, especialmente los siguientes: módulo de elasticidad y rigidez, masa (densidad), tamaño del elemento finito y geometría (tamaño o área). En consecuencia, una vez calibrado el modelo, los cambios subsecuentes en los parámetros estructurales serán considerados como daño (Quintana, 2009).

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

### **2.3 Método de Elemento Finito (MEF).**

Hoy en día, el concepto de Método de Elemento Finito (MEF) es muy amplio. Aun cuando comúnmente se restringe el análisis solamente a los problemas de análisis y mecánica estructural, el método puede ser utilizado en una gran variedad de maneras. El Método de Elemento Finito (MEF) es una técnica de interpolación, que permite transformar espacios de dimensión infinita a espacios de dimensión finita. El desarrollo del MEF como una herramienta de análisis se inició esencialmente con la creación de la computadora electrónica digital. En la solución numérica de un problema continuo es básicamente necesario para establecer y resolver un sistema de ecuaciones algebraicas (Bathe & Wilson, 1976).

Usando el MEF y con el apoyo de una computadora, es posible determinar y resolver las ecuaciones que rigen los sistemas complejos en una forma muy efectiva. Es principalmente por la generalidad de la estructura o su continuidad que puede ser analizada, por la relativa facilidad de establecer las ecuaciones que la representan, y por las buenas propiedades numéricas de las matrices del sistema que se ven envueltas que se ha encontrado un gran atractivo para este método (Bathe & Wilson, 1976).

El MEF es una herramienta fundamental para analizar una estructura real y se aplica para diferentes tipos de análisis o evaluaciones de una estructura; por ejemplo, se puede determinar, las respuestas dinámicas del sistema, la distribución de esfuerzos y las cargas térmicas y/dinámicas, entre otras (Bathe & Wilson, 1976). Para ello, es fundamental que el modelo de EF esté debidamente calibrado para que represente el comportamiento de la estructura real bajo las condiciones de operación consideradas; lo que implica conocer con aceptable exactitud todas las propiedades estructurales del sistema. La calibración de un modelo no es una tarea sencilla y por lo general se realiza mediante pruebas experimentales cuyos resultados se aplican directamente o se utilizan con métodos inversos para determinar los parámetros estructurales del modelo de EF (Quintana, 2009). El grado de exactitud en la calibración de un modelo de EF está en relación directa con el tipo de información que se extraerá del modelo. En algunos casos no es necesario un alto nivel de exactitud, por ejemplo, para conocer la distribución de esfuerzos; en otros casos, es necesario un nivel mayor en la calibración, por ejemplo, en la reconstrucción de cargas dinámicas o en la generación de las respuestas dinámicas del sistema.

Para calibrar un modelo de elemento finito de manera detallada es necesario que todos los parámetros estructurales tengan valores apropiados, similares o casi iguales a los del modelo físico, de tal forma que el comportamiento dinámico y estático del modelo EF sea igual o con poca variación respecto a la respuesta dinámica o estática experimental del modelo físico (Quintana, 2009). En este caso, un modelo de un sistema lineal puede ser representado como:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (2.6)$$

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

## 2.4 Algoritmos utilizados para detección de daño.

Un algoritmo puede ser definido como una serie finita de pasos para resolver un problema. Hay que hacer énfasis en dos aspectos para que un algoritmo exista:

- El número de pasos debe ser finito. De esta manera el algoritmo debe terminar en un tiempo finito con la solución del problema,
- El algoritmo debe ser capaz de determinar la solución del problema.

De este modo, podemos definir algoritmo como un " conjunto de reglas operacionales inherentes a un cómputo". Se trata de un método sistemático, susceptible de ser realizado mecánicamente, para resolver un problema dado (Valenzuela, 2006).

En este caso la solución al problema de detección de daño dependerá de la capacidad del algoritmo para detectar daño, según su clasificación antes mencionada, nivel 1, 2, 3 o 4.

En cualquier estructura de datos puede plantearse la necesidad de saber si un cierto dato está almacenado en ella, y en su caso en que posición se encuentra. Es el problema de la búsqueda. Existen diferentes métodos de búsqueda, todos parten de un esquema iterativo, en el cual se trata una parte o la totalidad de la estructura de datos sobre la que se busca. El tipo de estructura condiciona el proceso de búsqueda debido a los diferentes modos de acceso a los datos (Valenzuela, 2006).

La búsqueda es el proceso de localizar un registro (elemento) con un valor particular. La búsqueda termina exitosamente cuando se localiza el registro que contenga el valor buscado, o en su caso, cuando encuentra una solución o elemento que minimiza o maximiza una función objetivo. Algunos algoritmos utilizados para la búsqueda de daños en estructuras son el algoritmo de fuerza bruta y el algoritmo de Newton Raphson.

- **Algoritmo de solución directa.**

Es una técnica trivial pero a menudo usada, que consiste en enumerar sistemáticamente todos los posibles candidatos para la solución de un problema, con el fin de comparar si dicho candidato satisface la solución al mismo. El funcionamiento básico de este algoritmo es generar posibles soluciones de un problema y compararlas con alguna función objetivo, para así determinar si son o no buenas respuestas. La comparación de estas soluciones es lineal, se puede decir que va de izquierda a derecha hasta completar todo el conjunto de soluciones.

Un ejemplo del comportamiento básico del algoritmo de Fuerza Bruta, consiste en comparar dos cadenas de caracteres. Este algoritmo compara de izquierda a derecha cada letra de la palabra digitada por el usuario con cada letra del nombre del archivo encontrado dentro de la ruta que especifica el usuario (Jhonis, 2011).

- **Algoritmo de Newton Raphson.**

Es un algoritmo eficiente para encontrar aproximaciones de los ceros o raíces de una función real. También puede ser usado para encontrar el máximo o mínimo de una función, encontrando los ceros de su primera derivada. Para lo que es de gran funcionalidad cuando se busca minimizar o maximizar una función objetivo.

El algoritmo de Newton Raphson utiliza una metodología iterativa. Un método iterativo consiste en repetir un proceso hasta obtenerse un resultado. Los métodos iterativos son utilizados para hallar raíces de ecuaciones, soluciones de los sistemas lineales y no lineales y soluciones de ecuaciones diferenciales (Mathews & Fink, 2000). El proceso iterativo consiste en sustituir repetidamente en una fórmula el valor previamente obtenido.

El método de Newton es el más popular y el más ampliamente utilizado para una gran variedad de problemas y utilizado efectivamente en el cálculo de raíces. No obstante, este

método puede fallar en la convergencia en caso de que el valor inicial esté lejos de la raíz, cuando el valor de la derivada es pequeña en la vecindad de la raíz requerida o la función presente cambios rápidos en su derivada (Flores, 2008).

Como se puede observar los Algoritmos de Fuerza Bruta y Newton Raphson tienen buen desempeño en los procesos de búsqueda y en los procesos iterativos, pero presentan algunas complicaciones que se deben de optimizar; como es el hecho de que en su proceso realizan una búsqueda lineal, la cual, cuando se tiene una gran cantidad de datos vuelve muy lento el proceso de iteración, y también la desventaja de que los máximos o mínimos locales pueden hacer fallar la convergencia de dichos algoritmos.

Dadas estas desventajas, se propone la implementación de los Algoritmos Genéticos (AG) para optimizar el proceso de detección de daño. Los AG realizan una búsqueda aleatoria, en un principio, después utilizan los procesos de la evolución genética para generar nuevas posibles soluciones, permite que la convergencia sea mas rápida, y gracias a la implementación de los operadores genéticos, el riesgo de estancar la búsqueda en máximos o mínimos locales se reduce en gran parte.

## **2.5 Algoritmos Genéticos (AG).**

### **2.5.1 Introducción.**

La capacidad del ser humano para predecir el comportamiento de su entorno, se ha ido incrementando con el paso del tiempo. De igual modo, ha comprendido que, si bien era capaz de controlar muchos aspectos de su vida, y su interacción con lo que le rodeaba, no lo era para otros tantos. La inteligencia artificial es responsable de muchos de esos logros. Los pioneros de esta ciencia estaban tan interesados en la electrónica, como en la biología, y por eso sus aplicaciones iban desde calcular trayectorias de misiles, a tratar de modelar el cerebro, de imitar el proceso de aprendizaje humano, y de simular la evolución biológica. Los años ochenta (en el siglo pasado)

marcan el florecimiento del interés de la comunidad científica por estos temas computacionales inspirados en la biología, que han visto como su desarrollo les llevaba a cotas inimaginables, primero en el campo de las Redes Neuronales, luego en el del Aprendizaje, y por último en lo que ahora se conoce como “computación evolutiva”, de la que los Algoritmos Genéticos constituyen su máximo exponente (Rodríguez, 2011).

Esta técnica se basa en los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza, de acuerdo a los cuales los individuos más aptos de una población son los que sobreviven, al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno. Hoy en día se sabe que estos cambios se efectúan en los genes (unidad básica de codificación de cada uno de los atributos de un ser vivo) de un individuo, y que los atributos más deseables (los que le permiten a un individuo adaptarse mejor a su entorno) del mismo se transmiten a sus descendientes, cuando éste se reproduce sexualmente (Coello, 1995).

### 2.5.2 Recorrido histórico.

El origen de lo que se conoce como *computación evolutiva* hay que buscarlo en su razón de ser: los conocimientos sobre evolución se pueden aplicar en la resolución de problemas de optimización. Fue en las décadas de 1950 y 1960 cuando varios científicos, de modo independiente, comenzaron a estudiar los sistemas evolutivos, guiados por la intuición de que se podrían emplear como herramienta en problemas de optimización en ingeniería. La idea era “evolucionar” una población de candidatos a ser solución de un problema conocido, utilizando operadores inspirados en la selección natural y la variación genética natural (Rodríguez, 2011).

La primera mención del término Algoritmos Genéticos, y la primera publicación sobre una aplicación del mismo, se deben a Bagley (1967), que diseñó algoritmos genéticos para buscar conjuntos de parámetros en funciones de evaluación de juegos, y los comparó con los algoritmos de correlación, procedimientos de aprendizaje modelados después de los algoritmos de pesos variantes de ese periodo. Pero es otro científico de la Universidad de Michigan el

considerado creador de los Algoritmos Genéticos: John Holland, que los desarrolló, junto a sus alumnos y colegas, durante las décadas de 1960 y 1970. En contraste con las estrategias evolutivas y la programación evolutiva, el propósito original de Holland no era diseñar algoritmos para resolver problemas concretos, sino estudiar, de un modo formal, el fenómeno de la adaptación tal y como ocurre en la naturaleza, y desarrollar vías de extrapolar esos mecanismos de adaptación natural a los sistemas computacionales. A la técnica que inventó Holland se le llamó originalmente "planes reproductivos", pero se hizo popular bajo el nombre "algoritmo genético" tras la publicación de su libro en 1975 "*Adaptación en Sistemas Naturales y Artificiales*" presentaba el AG como una abstracción de la evolución biológica, y proporcionaba el entramado teórico para la adaptación bajo el AG. El AG de Holland era un método para desplazarse, de una población de cromosomas (bits) a una nueva población, utilizando un sistema similar a la "selección natural" junto con los operadores genéticos de cruce, mutación e inversión inspirados en la genética (Rodríguez, 2011).

La mayor innovación de Holland fue la de introducir un algoritmo basado en poblaciones con cruces, mutaciones e inversiones. Las estrategias evolutivas de Rechenberg comenzaban con una población de dos individuos, un padre y un descendiente, siendo éste una versión mutada del padre; hasta más tarde no se incorporaron poblaciones de más individuos, ni cruces entre ellos. En cuanto a los programas evolutivos de Fogel, Owens y Walsh, sólo utilizaban mutaciones para producir variaciones. En estos últimos años se ha generado una amplia interacción entre los investigadores de varios métodos de computación evolutiva, rompiéndose las fronteras entre algoritmos genéticos, estrategias evolutivas y programación evolutiva. Como consecuencia, en la actualidad, el término "algoritmo genético" se utiliza para designar un concepto mucho más amplio del que concibió Holland (Rodríguez, 2011).

La aplicación más común de los AG ha sido la solución de problemas de optimización, en donde han mostrado ser muy eficientes y confiables. Sin embargo, no todos los problemas pudieran ser apropiados para la técnica, y se recomienda en general tomar en cuenta las siguientes características del mismo antes de intentar usarla:

- Su espacio de búsqueda (sus posibles soluciones) debe estar delimitado dentro de un

cierto rango.

- Debe poderse definir una función de aptitud o función objetivo que nos indique qué tan buena o mala es una cierta respuesta.
- Las soluciones deben codificarse de una forma que resulte relativamente fácil de implementar en la computadora.

La codificación más común de las respuestas es a través de cadenas binarias, aunque se han utilizado también números reales y letras. El primero de estos esquemas ha gozado de mucha popularidad debido a que es el que propuso originalmente Holland (Coello, 1995).

### 2.5.3 Concepto.

Los algoritmos genéticos (AG) son un método de optimización y búsqueda basados en los mecanismos de selección y genética natural. Combinan la supervivencia de los más compatibles entre las estructuras de cadenas, con una estructura de información procesada aleatoriamente, intercambiada para construir un algoritmo de búsqueda con algunas de las capacidades de innovación de la búsqueda humana (Goldberg, 1989).

El poder de los AG se logra por la diversidad de los individuos de una población que evolucionan, en paralelo, siguiendo el principio de "la supervivencia del más apto". La diversidad de los individuos se obtiene y se mantiene con los operadores genéticos que permiten encontrar mejores soluciones y evitan la convergencia prematura a un máximo local (Holland, 1992).

Básicamente, el AG funciona como sigue: en cada generación, se crea un conjunto nuevo de "criaturas artificiales" (población) utilizando bits y partes más adecuadas del progenitor. Esto involucra un proceso aleatorio que no es, en absoluto, simple. La novedad que introducen los AG es que explotan eficientemente la información histórica para especular sobre nuevos puntos de búsqueda, esperando una evolución, es decir, un funcionamiento mejorado (Rodríguez, 2011).

La evolución, tal y como la conocemos, es básicamente un método de búsqueda entre un número enorme de posibles “soluciones”. En biología las posibilidades están formadas por un conjunto de secuencias genéticas posibles, y las soluciones deseadas, por organismos capaces de sobrevivir y reproducirse en sus entornos. La evolución puede verse, asimismo, como un modo de “diseñar” soluciones a problemas complejos, con la capacidad de innovar. Estos son los motivos de que los mecanismos evolutivos sean una fuente de inspiración para los algoritmos de búsqueda. Por supuesto, el buen funcionamiento de un organismo biológico depende de muchos criterios, que además varían a medida que el organismo evoluciona, de modo que la evolución está “buscando” continuamente entre un conjunto cambiante de posibilidades. Por ello, podemos considerarla como un método de búsqueda masivamente paralelo, ya que evalúa y cambia miles de especies en paralelo. Para terminar, las reglas de la evolución, aunque de alto nivel, son simples: las especies evolucionan mediante variaciones aleatorias (vía mutaciones, regeneraciones, etc.) seguidas por la selección natural, donde el mejor tiende a sobrevivir y reproducirse, propagando así su material genético a posteriores generaciones (Rodríguez, 2011).

#### 2.5.4 Elementos de los AG y su relación biológica.

Todos los organismos o individuos que conocemos están compuestos por una o más células, cada una de las cuales contiene a su vez uno o más  **cromosomas** (esto es, cadenas de ADN), que tienen la función de ser una especie de “anteproyecto” del organismo del que forman parte. Un cromosoma se puede dividir, conceptualmente, en  **genes**. Solemos pensar en los genes, aunque en una visión muy superficial, como los responsables de determinar los rasgos del individuo, tales como el color de los ojos, o del cabello, estatura o compleción física. Las diferentes posibilidades de escoger un rasgo (ojos azules, marrones o verdes, por ejemplo) reciben el nombre de  **alelos**. Cada gen está localizado en una determinada posición (lugar) dentro del cromosoma que integra (Rodríguez, 2011).

Muchos organismos tienen varios cromosomas en cada célula. El  **genoma** del organismo

es la colección completa del material genético. Lo que se conoce como **genotipo**, es el conjunto de genes contenido en un genoma. El genotipo dará lugar, tras el desarrollo fetal, al **fenotipo** del organismo, esto es, a sus características físicas y mentales, tales como el color de ojos, la estatura, o la inteligencia.

La mayoría de las especies reproductoras sexualmente que habitan nuestro planeta, almacenan sus cromosomas por parejas (son **diploides**, se llaman **haploides** en caso contrario). Durante la reproducción sexual se produce una **recombinación** o **cruce**: en cada padre, se intercambian los genes entre cada par de cromosomas, para formar un **gameto** (un cromosoma único), y entonces, los gametos de los dos padres se emparejan para constituir un conjunto completo de cromosomas diploides. La descendencia está sujeta a **mutaciones**, donde se produce un cambio en algún nucleótido (bits elementales de ADN) de padre a hijo; esas modificaciones son resultado habitualmente de “errores de copia” (Rodríguez, 2011).

Traslademos estos conceptos a la “vida artificial”: en los AG, el término **individuo** se refiere a una posible solución del problema, que a menudo se codifica como una cadena de bits. Los **genes** son tanto un bit como bloques cortos de bits adyacentes que codifican un elemento particular del candidato a solución (por ejemplo, son las características e información que conforman a la posible solución del problema, variando dependiendo del tipo de problema a resolver, cada dato característico se considera un gen). Un **alelo** en una cadena de bits será un 0 o un 1 (para alfabetos largos, soluciones no binarias, cada **lugar** puede tener más alelos). El **cruce** consiste, normalmente, como en la reproducción, en un intercambio de material genético entre dos cromosomas de dos individuos, considerados padres. La **mutación** es una modificación en un bit en un lugar aleatorio (en el caso de alfabetos largos, remplazar el símbolo de un lugar escogido aleatoriamente con un símbolo nuevo escogido también aleatoriamente) (Rodríguez, 2011).

En la mayoría de las aplicaciones de los AG nos encontraremos con **individuos haploides**, concretamente, de cromosomas únicos, es decir de una sola cadena de cromosomas unitarios. El **genotipo** de un individuo en un AG que emplea cadenas de bits es, simplemente, la

configuración de bits del cromosoma de ese individuo. La noción de **fenotipo** no aparece en el contexto de los AG, aunque avances recientes en la materia trabajan con algoritmos que poseen un nivel **genotipo** y uno **fenotipo** (por ejemplo, la cadena de bits que codifica un elemento estructural, y la estructura en sí misma). En la Figura 2.2 se puede observar como sería la idealización de un individuo, en este caso se representa la cadena de cromosomas en un lenguaje binario y no binario (alfabeto largo), cada bit o casilla tiene un valor que cuenta con características y propiedades físicas específicas (**genes**) dependiendo de su codificación.

De las investigaciones realizadas, se puede considerar que los AG tienen, al menos, estos elementos en común: poblaciones de individuos, selección en base a su capacidad, operadores genéticos para producir descendencia nueva, y la regeneración.



*Figura 2.2 Codificación binaria y no binaria de un individuo.*

Se puede idealizar a cada individuo de una población como en un punto en el espacio del conjunto de soluciones, es decir, son candidatos a solución del problema. El AG procesa poblaciones de individuos, reemplazando sucesivamente cada población por otra nueva. El algoritmo suele requerir de la función objetivo o aptitud que asigna una puntuación (la capacidad) a cada individuo de la población actual. La capacidad o el potencial de un individuo dependen de cómo resuelva ese individuo el problema a tratar. Por ejemplo, cuando se tiene

como función objetivo una ecuación que tienda a cero (ejemplo: ecuación de mínimos cuadrados), los individuos que minimicen esa ecuación lo más cerca a cero serán considerados los más aptos.

### 2.5.5 Operadores Genéticos.

Los operadores genéticos son funciones empleadas para mantener la diversidad genética de una población. Gracias a estos operadores se puede crear nuevas generaciones de individuos (posibles soluciones del problema). Son los encargados de las tareas de selección y reproducción de los individuos.

Existen varios tipos de operadores genéticos, cada uno de ellos se comporta de manera específica al crear nuevos individuos, por lo que se debe de revisar en que porcentajes serán utilizados para la creación de nuevas poblaciones. La optimización y buen funcionamiento de los AG dependen en gran medida de la eficacia de dichos operadores.

Los operadores se implementan en el AG con un determinado porcentaje, dicho porcentaje nos indicara con qué frecuencia cada uno realizara los procesos de reproducción para la regeneración de las poblaciones. A continuación se describen algunos de los operadores genéticos:

- **Selección:**

Este operador identifica y escoge los mejores individuos entre la población para efectuar la reproducción. Se requiere de la función objetivo o aptitud para que mediante la minimización de la misma, se identifique los individuos más aptos para dar solución al problema a resolver.

Los “mejores” individuos serán seleccionados para que continúen sobreviviendo en las nuevas generaciones hasta que se encuentre uno más capaz. También serán tomados para realizar en un porcentaje considerable, la reproducción de nuevos individuos. Se debe tomar en cuenta

que los primeros individuos más capaces no generan toda la población, ya que si solo se tomara a los “más aptos” se tendería a caer en máximos locales, haciendo que la búsqueda se restrinja a un sección muy pequeña del conjunto de soluciones.

- **Combinación:**

Opera sobre “n” cromosomas para generar un individuo con las características de ambos padres. El funcionamiento básico de este operador es la reproducción entre dos individuos (padres).

Un porcentaje de los padres son seleccionados de entre los mejores individuos. Para garantizar la diversidad de las nuevas generaciones, otro porcentaje debe ser elegido de los “medianamente” aptos. Se recomienda que un porcentaje de la combinación sea variada, es decir, el padre puede ser de los mejores clasificados y la madre del resto de la población, para que se enriquezca el intercambio genético.

En la Figura 2.3 se muestra como es la combinación de dos individuos (padres). En el caso del padre y la madre tienen una configuración binaria. Al realizarse la combinación genética se crean nuevos individuos (descendencia) con las características de los padres. Este procedimiento se realiza mediante una selección estocástica de un punto de cruce, en la que el AG va analizando cada una de las posiciones y decidiendo que características (cromosoma) será heredado a la nueva descendencia. En Figura 2.3 solo se muestra un punto de cruce, pero este proceso puede tener uno o varios puntos de cruce, dependerá cuantos cromosomas tengan los individuos, es decir puedes cruzar cada uno de los cromosomas de los individuos. La probabilidad de que un cromosoma continúe en el nuevo individuo es del 50%, ya que solo hay dos posibles respuestas: continúa en el siguiente individuo o no continúa.

Este operador es el que mayor contribuye a la generación de nuevos individuos, ya que permite tener una gran diversidad de individuos, algunos autores sugieren un porcentaje de

combinación entre el 30 y 60% (Goldberg, 1989). Para cada problema los AG se comportan de manera distintita, por lo que se ha observado que es conveniente hacer pruebas cambiando los porcentajes para poder observar que cantidad funciona mejor para el problema a resolver.

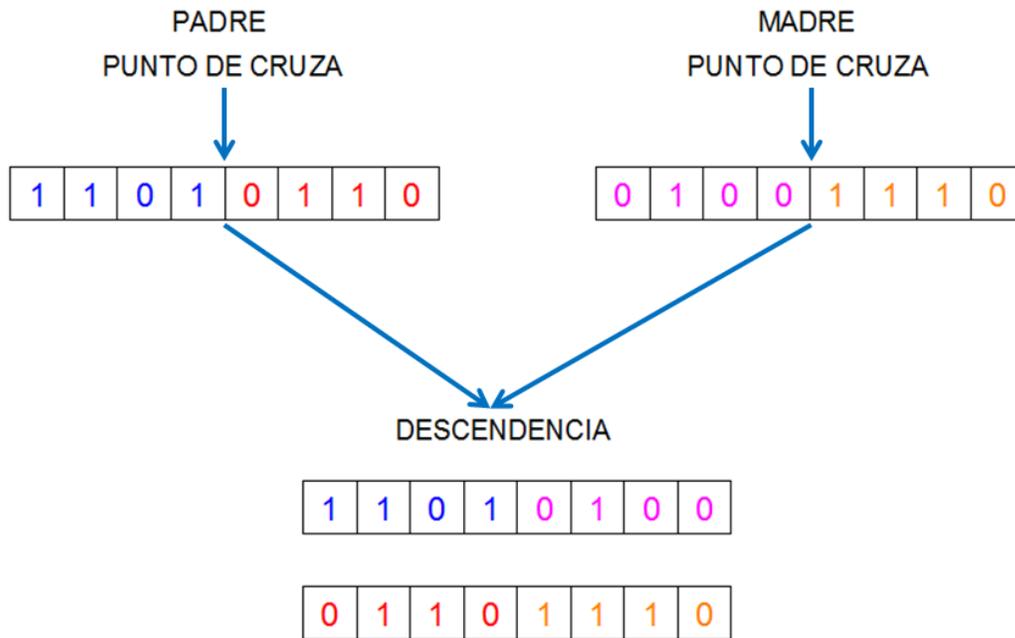


Figura 2.3 Operador de Combinación con un solo punto de cruza.

- **Mutación:**

Modifica al azar parte del cromosoma de los individuos, y permite alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual.

Este operador realiza una selección aleatoria de los cromosomas que se van a cambiar. En el proceso de selección de los individuos es conveniente tomar cierto porcentaje de los individuos mejor calificados, para así realizar búsquedas y cambios muy finos en los cromosomas, los cuales nos permitirán conseguir individuos más capaces.

En la Figura 2.4 se presenta en primera instancia al individuo padre, el cual tiene una configuración binaria, el operador de Mutación analiza cada uno de los cromosomas y mediante un proceso al azar decide si muta o no el cromosoma evaluado. Para el caso del ejemplo escoge tres cromosomas y los muta mediante un proceso sencillo, es decir si el cromosoma seleccionado tiene un 0 lo cambia a 1, y viceversa. Generando así nuevos individuos.



*Figura 2.4 Operador de Mutación.*

Para la creación de nuevos individuos mediante mutación, algunos autores recomiendan utilizar porcentajes bajos (entre 1 y 10% aproximadamente), ya que es un proceso en el cual los cambios son muy pequeños y se deriva de los individuos calificados como los más aptos (Goldberg, 1989). La razón por la que se utiliza una cantidad baja de mutación se debe a que, como se seleccionan los individuos más aptos como padre, si usáramos un porcentaje grande se tendería a estancar en máximos locales, haciendo que la búsqueda sea vuelva limitada.

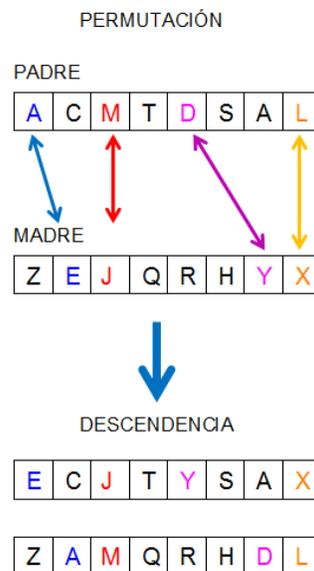
- **Permutación:**

Con la permutación se intercambia uno o varios de los cromosomas de dos individuos para generar nuevas poblaciones. Actúa sobre los individuos seleccionados como padres (dos

individuos: padre y madre). La selección se realiza de un porcentaje alto de los individuos totales de la población total para garantizar la diversidad de genes, descartando únicamente los menos aptos.

Se ha observado que la permutación tiene grandes propiedades para la regeneración, el procedimiento es sencillo pero permite una gran diversidad de los individuos. Los porcentajes recomendados de permutación dependen del problema a resolver, es muy similar al del operador genético de combinación de entre 20 y 60% de reproducción por permutación, se recomienda, como con los demás operadores genéticos, realizar iteraciones prueba con distintos porcentajes de permutación para observar su comportamiento.

Como se ejemplifica en la Figura 2.5, el operador genético de permutación, selecciona a los dos padres, después mediante un proceso estocástico selecciona alguno de los elementos, su codificación es no binaria, es decir, de alfabeto largo para poder observar claramente su proceso. En el caso del padre, selecciona parte de los cromosomas (los elementos A, M, D, L) y de la madre también (los elementos E, J, Y, X) para permutarlos (intercambiarlos) entre ellos. Como se puede observar mediante este proceso se generan dos nuevos individuos.



*Figura 2.5 Operador de permutación para una codificación no binaria.*

- **Clonación:**

La clonación biológica puede definirse como una forma de reproducción asexual que produce individuos genéticamente idénticos. Es decir no se requiere de dos individuos para reproducir un individuo nuevo.

En los AG se emplea el operador genético de clonación de tal modo que se genera un clon de los individuos considerados más aptos, para que pasen a la siguiente generación (Figura 2.6). Con esto se garantiza que la minimización o maximización de la función objetivo continúe descendiendo o subiendo respectivamente, o en el peor de los casos se mantenga la misma que en la generación anterior hasta que llegue un individuo mejor adaptado y minimice más la función.



*Figura 2.6 Clonación de un individuo con codificación binaria.*

El porcentaje de clonación es muy bajo alrededor del 1 al 5% de la población total, también es usual que un mismo porcentaje que el que se usa para clonar los mejores individuos sea utilizado para clonar individuos seleccionados del resto de la población, descartando únicamente los menos capaces, para así, favorecer la diversidad de la población y reducir el riesgo de estancar la búsqueda en una sola zona.

- **Regeneración:**

Con el operador de regeneración, se crean individuos nuevos. La creación de dichos individuos es aleatoria. Un porcentaje bajo de la población es creado mediante este proceso. Con esto nos permite tener mayor diversidad en las poblaciones.

El porcentaje de regeneración es bajo dado que se trata de un proceso estocástico, el cual no garantiza la evolución de los individuos, pero si se obtiene diversidad genética. En la Tabla 2-1 se muestran distintas observaciones sobre el comportamiento de algunos operadores genéticos.

*Tabla 2-1 Observaciones de algunos autores sobre los operadores genéticos.*

Autor.	Operador Genético.	Observación.
1. (Schaffer, 1989)	Mutación.	Por si sola no siempre es suficiente, necesita el cruce o combinación.
2. (Spears & De Jong, 1991)	Cruce o combinación	Cruce de múltiples puntos del AG (recombinación exploratoria)
3. (Spears & De Jong, 1991)	Adaptación y selección	Decide entre 2 puntos de cruce y el uniforme. Funciona bien especialmente en poblaciones grandes.
4. (Goldberg, 1989)	Criterios de convergencia.	Relación entre el número de generaciones y el error mínimo
5. (Merchán, 2005)	Mecanismo de herencia forzada.	Complementa la regeneración, introduce cromosomas especializados con base al elitismo durante el proceso de mutación y cruce.
6. (Schaffer, 1989)	Porcentajes de los operadores genéticos y el número de individuos y generaciones	Poblaciones grandes (>200) % mutación alto (>0.05) Poblaciones pequeñas (<20) % mutación bajo (<0.002) No mejoran el desempeño de un AG.
7. (Lima, 2005)	Cruce y mutación	Tienen un buen desempeño en conjunto
8. (Borges, et al., 2006)	Mutación y Creep Mutation.	Comparación entre la mutacion y creep mutation. La mutacion tradicional no efectiva para el problema específico desarrollado.

### 2.5.6 Ventajas y desventajas de los AG.

Los AG difieren de otros métodos de búsqueda y optimización en los siguientes aspectos:

- No necesitan conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver.
- Trabajan con un código del conjunto de parámetros, no con el conjunto mismo (necesitan) que el conjunto de parámetros del problema de optimización esté codificado en cadenas finitas sobre un determinado alfabeto). Por trabajar a nivel de código, y no con las funciones y sus variables de control, como los otros métodos, son más difíciles de “engañar”.
- Buscan una población de puntos, no un único punto. Manteniendo una población de puntos muestrales bien adaptados, se reduce la probabilidad de caer en una cima o solución falsa.
- Emplean la función objetivo, no necesitan derivadas ni otra información complementaria, tan difícil a veces de conseguir. De este modo ganan en eficiencia y en generalidad.
- Operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales.
- Cuando se usan para problemas de optimización (minimizar o maximizar una función objetivo) resultan menos afectados por los máximos o mínimos locales (falsas soluciones) que las técnicas tradicionales.
- Se valen de reglas de transición estocástica, no determinista. Los Algoritmos Genéticos se valen de operadores aleatorios para guiar la búsqueda de los mejores puntos; puede parecer extraño, pero la Naturaleza está llena de precedentes al respecto.
- Pueden tardar mucho en converger, o no converger en absoluto, dependiendo en gran medida de los parámetros que se utilicen: tamaño de la población, número de generaciones y porcentajes de los operadores genéticos.

### 2.5.7 Aplicaciones de los AG.

Los AG se han investigado y desarrollado durante las últimas décadas. Se ha observado que los AG tienen un gran rendimiento para resolver problemas de optimización en diversas áreas de investigación. Por lo que han sido aplicados para desarrollar complejas tareas de optimización en varias aplicaciones prácticas (Goldberg, 1989). Algunas de las aplicaciones para los AG se presentan a continuación:

- **Optimización:**

Es un campo especial para el uso de los AG, por las características específicas de estos problemas. No en vano fueron la fuente de inspiración para los creadores estos algoritmos. Los AG se han utilizado en numerosas tareas de optimización, incluyendo la optimización numérica, y los problemas de optimización combinatoria.

- **Programación evolutiva:**

Se han empleado para desarrollar programas para tareas específicas, y para diseñar otras estructuras computacionales tales como algoritmos evolutivos y redes neuronales.

- **Sistemas sociales:**

En el estudio de aspectos evolutivos de los sistemas sociales, tales como la evolución del comportamiento social en colonias de insectos, y la evolución de la cooperación y la comunicación en sistemas multi-agentes.

- **Economía:**

En este caso, se ha hecho uso de estos Algoritmos para modelar procesos de innovación, el desarrollo estrategias de inversión, y la evaluación de mercados económicos.

- **Aprendizaje máquina:**

Aplicados en muchas de estas aplicaciones, tales como la predicción del tiempo o la estructura de una proteína. Han servido asimismo para desarrollar determinados aspectos de sistemas particulares de aprendizaje, como el de los pesos en una red neuronal, las reglas para sistemas de clasificación de aprendizaje o sistemas de producción simbólica, y los sensores para robots.

- **Biología:**

En la modelización de fenómenos ecológicos tales como las carreras de armamento biológico, la coevolución de parásito-huésped, la simbiosis, y el flujo de recursos.

- **Ingeniería:**

En particular, para la detección de daños en estructuras, varias propuestas han sido presentadas en la última década en un intento para diseñar un procedimiento eficaz para la detección de daños (Borges, et al., 2006) (Meruane & Heylen, 2010) (Waisman, et al., 2009) (Kouchmeshky, et al., 2006) (Casciati, 2008) (Kouchmeshky, et al., 2007). Estas estrategias por lo general presentan variaciones en los escenarios de daño por lo que es necesario un AG como optimizador del procedimiento de búsqueda de daño (Goldberg, 1989) (Holland, 1992).

Solo se hace mención de algunos casos de aplicación de los AG, con lo cual se transmite la idea de la variedad de aplicaciones que tienen los AG. Gracias al éxito en estas y muchas otras áreas, los AG han llegado a ser una línea de investigación a la alza en la actualidad.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.

### 3.1 Descripción de la Metodología para aplicar los AG en la detección de daño en estructuras.

Se plantea la adaptación de los AG para la detección de daño, se fundamentaran de la técnica de detección de daño mediante el análisis de propagación de ondas, utilizando los AG como método de optimización. Los AG generaran casos hipotéticos de daño, que a su vez, serán comparados con un modelo inicial de la estructura que se desee analizar, determinando en un inicio sus propiedades, características y daños a buscar, lo cual nos permitirán observar la convergencia del AG diseñado.

Como se observa el comportamiento de los AG es en un principio aleatorio. Es decir genera una primera población de individuos (posibles soluciones del problema) totalmente aleatoria. Después mediante una minimización de una función objetivo se califica el comportamiento individual de cada posible solución (individuo) y dependiendo de esta calificación serán clasificados como “aptos” o “no aptos”, es decir, los individuos que tengan un error menor serán considerados como los más aptos. Una vez clasificados los individuos, se procede a la generación de una nueva población evolucionada de individuos, la adaptación del término “evolucionar” en los AG, se refiere a que cada generación contiene individuos con mejor comportamiento (soluciones más cercanas a la respuesta). La nueva población se genera mediante la implementación de los operadores genéticos, los cuales se analizan y se prueba su funcionamiento, para así, decretar cuales y en que porcentajes tienen el mejor desempeño.

La primera tarea de los operadores genéticos es la selección de los individuos que serán considerados como padres. La segunda tarea que realizan es la reproducción de los padres, la cual dará lugar a nuevos individuos, los cuales, al igual que en la genética natural heredaran los genes de sus progenitores, creando así nuevos individuos más aptos con características más cercanas a la solución real. La tercera actividad es la regeneración, la cual crea individuos

mediante el mismo proceso de la población inicial, de forma aleatoria, con lo cual se garantiza la diversidad de individuos, generando nuevos puntos de búsqueda, ayudando así a no centrar la búsqueda en máximos o mínimos locales.

### 3.2 Selección del método de detección de daño.

Para el diseño y aplicación de un AG para la detección de daño, se parte de una técnica de evaluación de daño ya desarrollada y validada. Esta técnica se basa en el análisis de la propagación de ondas en la estructura, es un método que permite conocer el daño a partir de los cambios en la propagación de las ondas transmitidas y reflejadas en la estructura (Quintana, 2009).

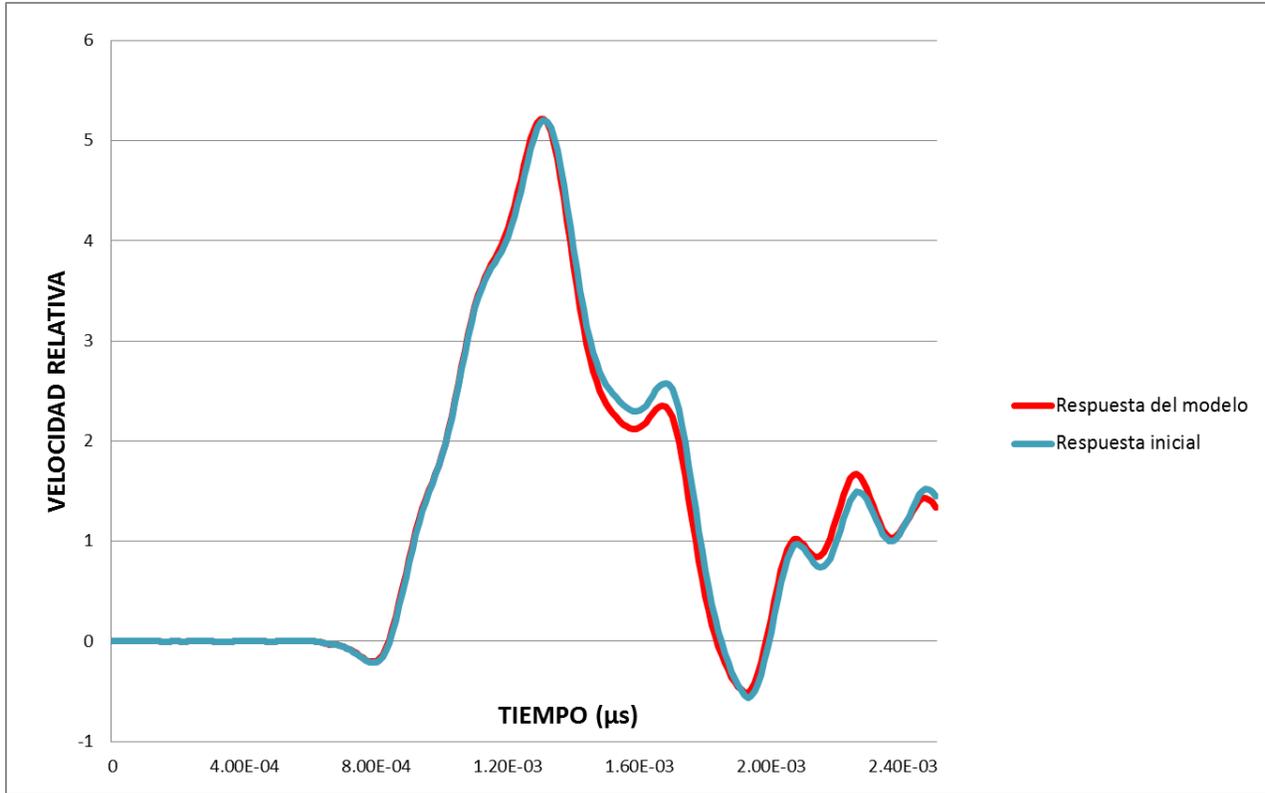
El diseño se fundamenta en desarrollar un AG que busca cambios en los parámetros estructurales que minimiza una función objetivo. De manera muy concisa, cuando hay daño, existe un cambio entre las respuestas dinámicas de la estructura, respecto a la condición sin daño. Como metodología de detección, este enfoque tiene una limitante y es el hecho de que se requiere una referencia de la condición actual de la estructura (antes del daño). Una alternativa para dar mayor flexibilidad al método, es remplazar la información de la estructura original con un modelo de elemento finito calibrado (Quintana, 2004) (Doyle, 2004) a través de pruebas dinámicas sobre la estructura.

El Método de Búsqueda Global (MBG) se basa en el análisis de propagación de ondas en la estructura, por lo cual tomaremos como base algunos de sus fundamentos para el diseño del AG. El MBG se enfoca al problema de localización de daño mediante la identificación de cambios en los parámetros estructurales a partir de la propagación de ondas de alta frecuencia en la estructura. La base de este método radica en tres módulos básicos, la primera la existencia de un modelo estructural de elemento finito (EF) previamente calibrado que represente el comportamiento dinámico de la estructura en su condición de referencia o “sin daño” ; la segunda, la parte experimental, cuyo objetivo es obtener la respuesta dinámica de la estructura

ante una excitación en puntos específicos de interés, es decir, recolectar las ondas de propagación que pasan en un punto de la estructura; y la tercera, un algoritmo que almacena, compara, evalúa las respuestas dinámicas experimentales con las generadas por el modelo de elemento finito de la estructura (Quintana, 2009).

Las ondas que se propagan ante la excitación de la estructura son transmitidas, reflejadas y atenuadas, por la interacción de los diferentes materiales en la estructura, por cambios en la geometría en el medio de propagación, por las condiciones de frontera, etc. (Doyle, 1997). Estas propiedades de las ondas flexionantes se utilizan para la detección y ubicación de daño; si se parte de una estructura sin daño, las ondas registradas tendrán un patrón de propagación acorde a las propiedades mecánicas de los materiales y su geometría en la estructura, cuando existe un daño, una alteración en las propiedades o geometría de la estructura el patrón de propagación cambia, haciendo posible la detección de daño (Figura 3.1), asumiendo el daño como un cambio en los parámetros estructurales.

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



*Figura 3.1 Comparación de las Respuestas dinámicas de un caso fijo a buscar y una posible solución.*

El daño es sinónimo de cambios en la estructura que demeritan la capacidad estructural inicial. Estos cambios, directamente o indirectamente, se manifiestan en pérdida de masa o de rigidez en el modelo estructural. En el MBG solo se consideran los parámetros estructurales directos, especialmente los siguientes: módulo de elasticidad y rigidez, masa (densidad), tamaño del elemento finito y geometría (tamaño o área). Así, se establece que el daño es todo aquel cambio en la estructura que involucre los parámetros estructurales (Quintana, 2009).

Como se mencionó anteriormente, en el tercer módulo del MBG se utiliza un algoritmo que almacena, compara, evalúa las respuestas dinámicas experimentales con las generadas por el modelo de elemento finito de la estructura. Por lo que es posible, mediante la metodología del MBG, utilizar los Algoritmos Genéticos (AG), para la detección y evaluación de daño en estructuras.

Para el diseño del AG y la realización de las pruebas experimentales de convergencia, a diferencia del MBG, el algoritmo no realizara una búsqueda discretizada sobre todo el conjunto de soluciones, si no que la búsqueda se realizara a través de los operadores genéticos, sobre el conjunto de soluciones, lo que permitirá la convergencia del algoritmo a una respuesta exacta y la búsqueda de múltiples daños en la estructura.

Se define al individuo como la modificación de un conjunto de parámetros estructurales en el modelo inicial de EF calibrado, por lo tanto los individuos (posibles soluciones) que crea el AG, serán modelos de EF de la misma estructura con casos hipotéticos de daños, a los cuales se le aplica una fuerza de excitación conocida la cual permite obtener las respuesta dinámica para cada uno de los individuos, dicha respuesta es comparada mediante una función objetivo con la respuesta dinámica de un caso real de daño en la estructura (Figura 3.1), el individuo con la respuesta dinámica más similar a la respuesta dinámica del modelo o caso fijo, será considerado como más apto. Después se procede a revisar la convergencia, es decir, observar si los casos hipotéticos de daño del individuo seleccionado como más apto, coinciden con los daños conocidos del modelo fijo, para así poder decretar si es o no una buena solución y evaluar si un conjunto de operadores genéticos es apropiado para la búsqueda de daño.

Para la realización de las pruebas de esta investigación, únicamente se considera como daños los cambios en la geometría de los elementos estructurales, es decir, reducciones en la sección transversal. Un cambio en la sección transversal afecta a su vez algunas propiedades estructurales como son: momentos de inercia, radio de giro, módulos de sección y sus centroides.

### **3.3 Definición de la función error para evaluar daño estructural.**

La función de aptitud no es más que la función objetivo de nuestro problema de optimización. Una característica que debe tener esta función es que debe ser lo suficientemente sensible a los cambios en las ondas de propagadas para ser capaz de identificar la solución óptima.

Mediante la utilización de la técnica del análisis de la propagación de ondas en la estructura, es necesario una función objetivo que nos proporcione el error que existe al comparar la respuesta dinámica del caso fijo “con daño” contra la respuesta dinámica de cada uno de los individuos de la población, considerando así, mejores individuos aquellos que tengan un error cercano a cero. Si durante la comparación de las respuestas dinámicas la función objetivo arroja un error igual a cero, significa que no existe ninguna diferencia entre ellas, es decir, son totalmente iguales.

Una función que cumple con estas necesidades es la función de error de mínimos cuadrados, que se aplica de manera independiente para cada nodo “instrumentado”. Mediante el uso de StaDyn se proporciona información para ciertos nodos de interés que el usuario define, simulando que en dichos nodos se encuentran instrumentados, es decir, que cuentan con sensores. Así, la variación asociada a un cambio en los parámetros estructurales se cuantifica usando esta **función de mínimos cuadrados**:

$$V_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (r_{i,j,daño} - r_{i,j,ind})^2}{N}} \quad (3.1)$$

Que se obtiene de la diferencia entre la respuesta dinámica experimental en el nodo  $j$   $\{r_{daño}\}_j$  y la respuesta del individuo analizado en ese mismo nodo  $j$   $\{r_{ind}\}_j$ . En este caso, el vector de respuestas  $\{r\}_j$  puede estar definido por los desplazamientos  $\{u\}$ , las velocidades  $\{\dot{u}\}$  o las aceleraciones  $\{\ddot{u}\}$ , según el tipo de sensor que se utilice. Si no hay diferencia entre ambas respuestas, significa que los parámetros estructurales utilizados en el modelo del individuo corresponden con los del caso fijo. Así, cuando la variación de las respuestas dinámicas es significativa, se infiere que no se ha encontrado un individuo cercano al caso fijo de búsqueda y que, mediante un AG, es posible crear nuevos individuos con evoluciones en los parámetros estructurales para minimizar dicha variación de las respuestas dinámicas e inferir que se ha detectado, ubicado y cuantificado los daños que presenta la estructura. El término  $r_i$  representa la respuesta dinámica en el nodo  $j$  al tiempo  $i$  y  $N$  es el número de datos en el que dicha respuesta es discretizada en el tiempo. Esta función es empleada en el MBG (Quintana, 2009) por lo que

ya se ha observado su buen funcionamiento para la obtención del error entre las respuestas dinámicas.

### 3.4 Definición del individuo.

Una parte esencial para el diseño del AG, es la codificación del individuo. De dicha codificación dependerá en gran medida la eficacia y eficiencia del AG. Como se comentó anteriormente la codificación del individuo, ya sea binaria o de alfabeto largo (no binaria), depende del tipo de problema a tratar.

Para el problema de detección de daño en estructuras desarrollado en esta investigación se utiliza una codificación esencialmente no binaria, sin embargo, algunos autores recomiendan no dejar a un lado el lenguaje binario, por lo que se hace una representación binaria y no binaria del individuo. Fundamentalmente el individuo será concebido con una codificación no binaria pero se puede tener una interpretación en lenguaje binario del mismo.

El individuo para el AG utilizado para la detección de daño, es el modelo de EF completo de la estructura. El mallado del modelo de EF se considera como la cadena de cromosomas; cada elemento finito discretizado contienen la información de las características y propiedades estructurales (genes) de los elementos que conforman la estructura. Los cromosomas de la estructura contienen el material genético de la misma, el cual, es el que hereda las nuevas poblaciones de individuos como son: tipo de material, masa, densidad, geometría (sección transversal), momentos de inercia y sus condiciones de frontera. En nuestro caso inicial, todos los elementos finitos tendrán parámetros estructurales homogéneos, es decir, no presentaran valores diferentes entre ellos. Al haber un cambio en los parámetros estructurales de un elemento finito (cromosoma), dicho cambio será considerado como daño. Para su ubicación bastara con observar que numero de elemento finito es donde se presenta el cambio y su extensión o gravedad dependerá de la magnitud del cambio, es decir, que porcentaje cambio en relación con el valor inicial.

En la Figura 3.2 se puede observar la idealización de un elemento estructural tipo viga (individuo), en este caso se discretiza la viga en elementos finitos (cadena de cromosomas) con características y propiedades físicas específicas (genes), los elementos que presentan algún cambio en dichas propiedades serán considerados con daño. Su codificación en lenguaje binario sería de 0, cuando el elemento finito conserva sus propiedades originales, y 1 cuando presentan daño.



*Figura 3.2 Codificación de un elemento estructural tipo viga (individuo).*

Los daños considerados para esta investigación serán solamente cambios en la sección transversal, lo cual se conceptualiza como una disminución en el área de la sección transversal de los elementos estructurales y sus respectivas variaciones en los momentos de inercia. Las características de los daños serán tres:

- **Ubicación del daño.** En que elemento finito comienza la disminución de la sección transversal.
- **Extensión del daño.** Cuantos Elementos finitos a partir del primer ubicado presentan ese mismo daño.
- **Magnitud del daño.** Porcentaje en relación al área inicial que disminuye.

Estas tres características que presentan los daños serán las que permitan hacer que el AG detecte, ubique y cuantifique los daños. También serán utilizadas por el AG para generar los individuos de cada población. Cabe mencionar que el cambio en sección transversal no es el único deterioro que se puede considerar, mediante una adaptación en el AG se puede también detectar daño a partir de cambios en los demás parámetros estructurales antes mencionados.

El diseño del modelo de elemento finito es una parte importante en la aplicación del AG para la detección de daño. Como consecuencia, en este aspecto es donde se requiere mayor precisión y por lo mismo, consume mucho tiempo para su realización.

Para diseñar un modelo de elemento finito de manera detallada es necesario que todos los parámetros estructurales tengan valores apropiados. En este caso, un modelo de un sistema lineal puede ser representado como:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (3.2)$$

Dónde:

$[M]$  = Matriz de masa estructural.

$[K]$  = Matriz de rigidez.

$\{\ddot{u}\}$  = Aceleración.

$\{u\}$  = Desplazamiento.

$[C]$  = Matriz de amortiguamiento.

$\{P\}$  = Fuerzas.

$\{\dot{u}\}$  = Velocidad.

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

### 3.5 Selección de Operadores Genéticos.

La selección de los operadores genéticos se realiza en base a su funcionamiento. Se seleccionan las funciones que permitan mantener la diversidad genética de una población. Gracias a estos operadores se puede crear nuevas generaciones de individuos (posibles soluciones del problema). De ellos dependerán todas las tareas de selección y reproducción de los individuos.

En las siguientes líneas se describe cómo será la adaptación de los operadores genéticos utilizados en esta investigación para el problema de detección de daño en estructuras. Para una simplificación y mejor comprensión, se ejemplifica los operadores genéticos para el caso de un elemento estructural tipo viga, la adaptación para una estructura más compleja es exactamente igual, solamente aumenta el número de cromosomas (elementos finitos) en los que es discretizada la estructura. Como se menciona anteriormente el daño tiene tres características (Ubicación, extensión y magnitud del cambio en la sección transversal) las cuales serán los genes que los operadores genéticos reproducirán y heredaran a las nuevas descendencias.

- **Combinación.**

En la Figura 3.3 se ejemplifica como es la combinación de dos individuos (padres) para este ejemplo. En el caso del padre tiene una configuración con tres daños específicos (A, B, C); la madre tiene dos daños (D, E). Al realizarse la combinación genética se crea un nuevo individuo (descendencia) con algunas de las características de los padres. En este caso el individuo generado toma los tres daños característicos del padre (A, B, C) y solo uno de la madre (D), despreciando el último daño (E). Este procedimiento se realiza mediante una selección estocástica, en la que el AG va analizando cada uno de las características de cada padre y decidiendo si dicha característica (cromosoma) será heredado a la nueva descendencia. La probabilidad de que un cromosoma continúe en el nuevo individuo es del 50%, ya que solo hay dos posibles respuestas: continúa en el siguiente individuo o no continúa.

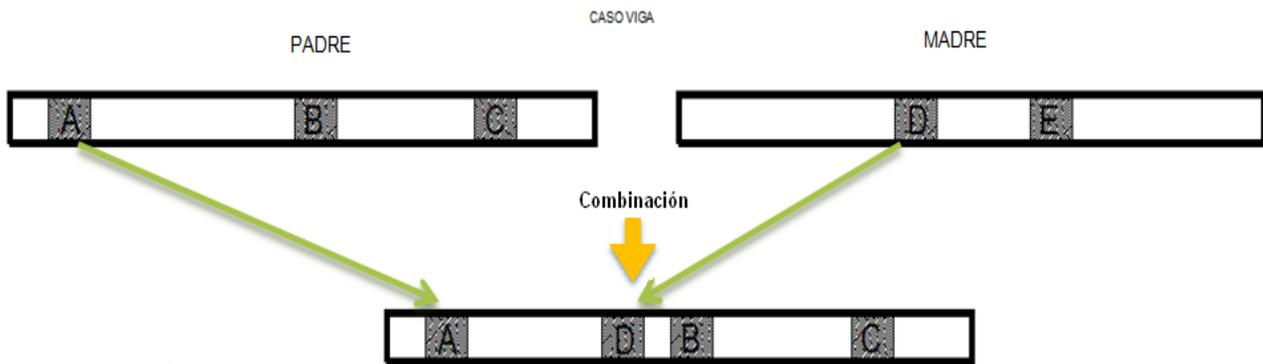
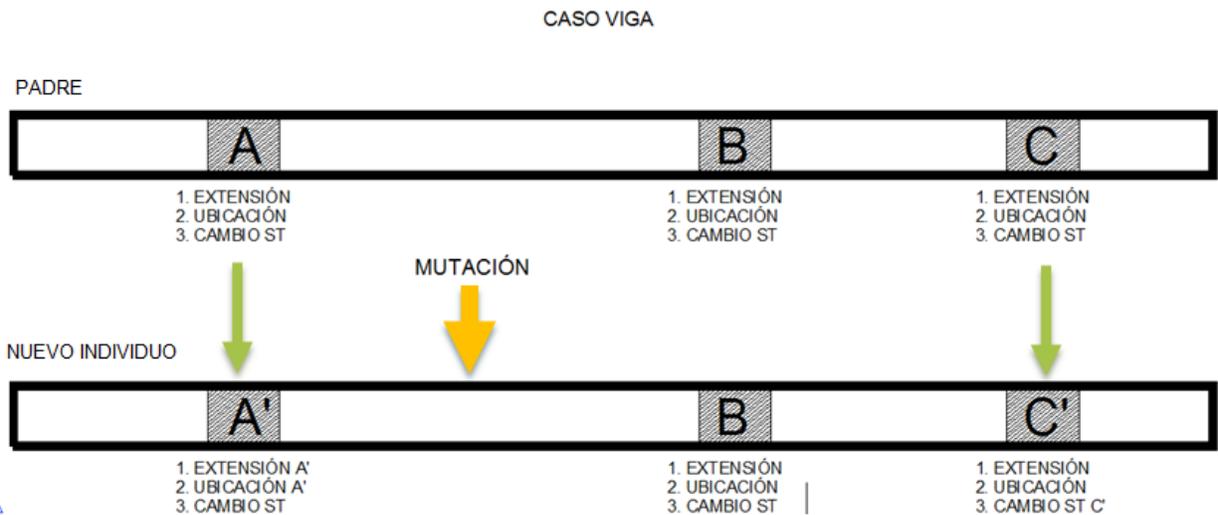


Figura 3.3 Operador de Combinación para el caso de un elemento tipo viga.

- **Mutación.**

En la Figura 3.4 se presenta en primera instancia un ejemplo de un individuo padre, el cual tiene tres daños localizados (A, B, C), los cuales contienen las tres características que los identifican (extensión, ubicación, cambio en la sección transversal).

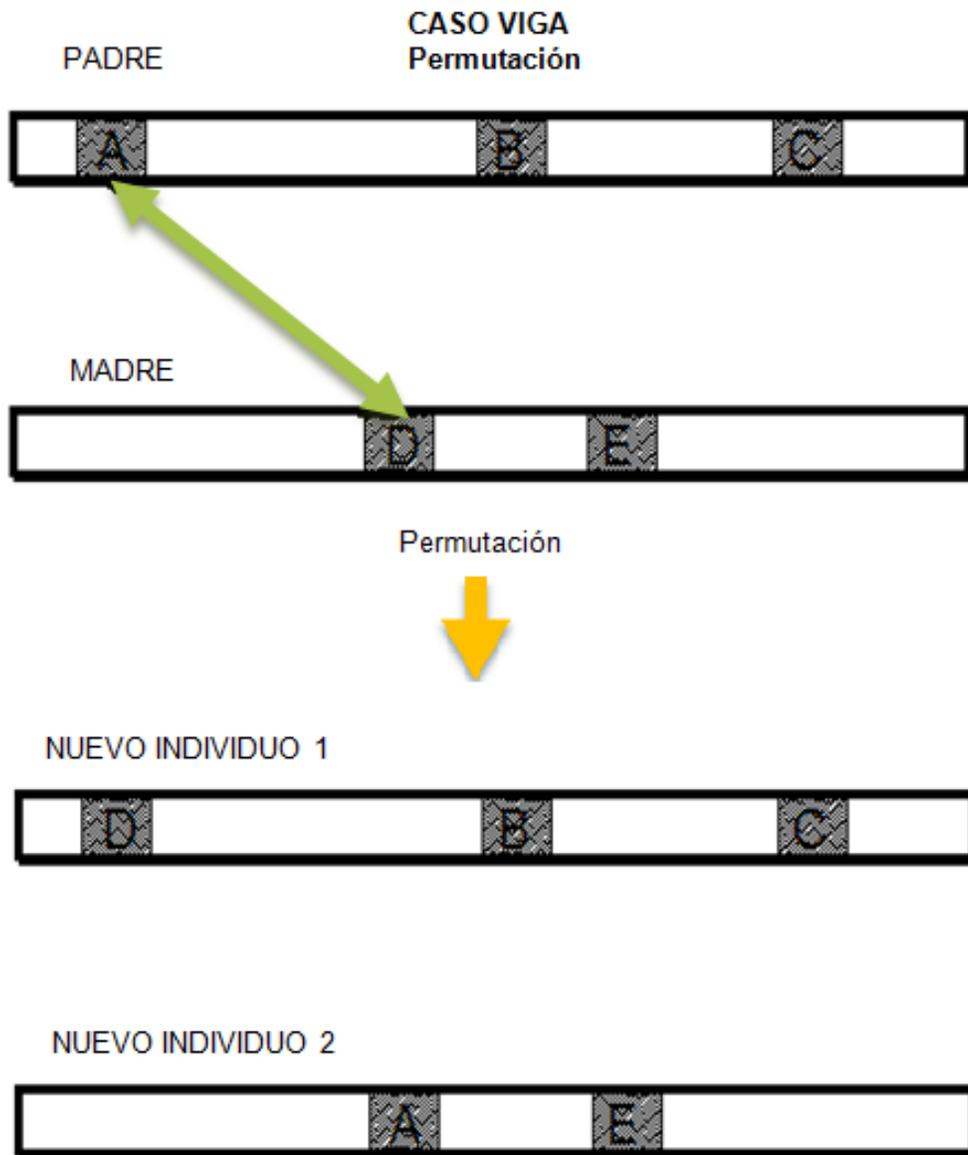
Para el caso que se ejemplifica, el operador genético selecciona aleatoriamente una de las tres características del daño, pudiendo o no presentar alguna mutación en ellas, por ejemplo: para el daño A solo se muta la extensión y manteniendo los otros atributos sin cambio al igual que los otros daños. Con esto se genera el nuevo individuo con la misma cantidad de daños que el padre solo que con una mutación en uno de los atributos en dos de los daños.



*Figura 3.4 Operador de Mutación para el caso tipo viga.*

- **Permutación.**

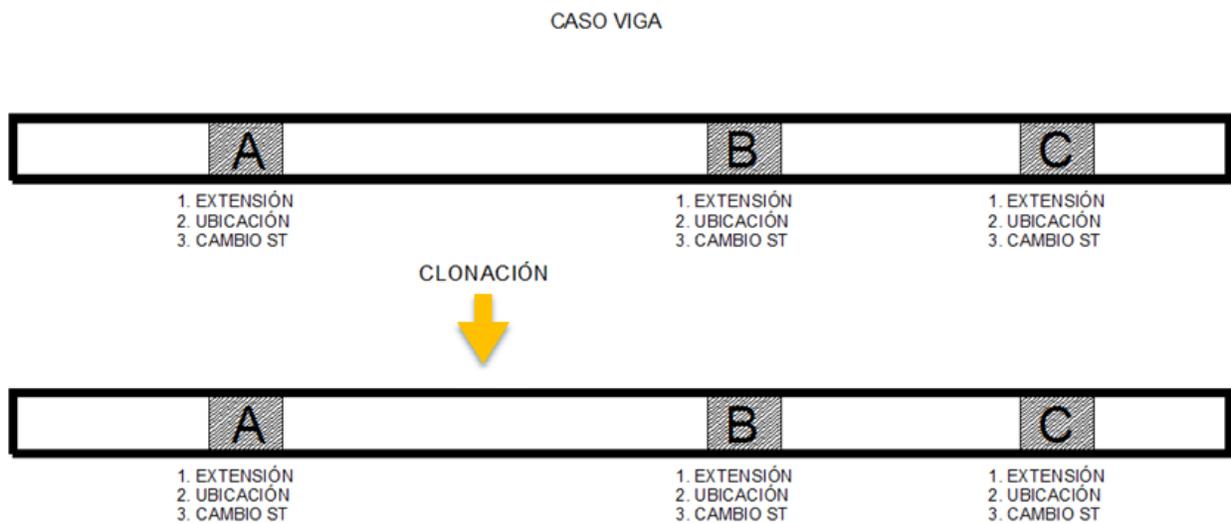
Como se ejemplifica en la Figura 3.5, el operador genético de permutación, selecciona a los dos padres, después mediante un proceso estocástico selecciona alguno de los elementos dañados, en el caso del padre, tiene tres daños localizados (A, B, C) y la madre tiene solo dos (D, E). En este caso se selecciona el daño A para permutarlo (intercambiarlo) con el daño D de la madre. Como se puede observar mediante este proceso se generan dos nuevos individuos



*Figura 3.5 Operador genético de permutación para un elemento tipo viga.*

- **Clonación:**

En los AG se emplea el operador genético de clonación de tal modo que se genera un clon de los individuos considerados más aptos, para que pasen a la siguiente generación (Figura 3.6). Con esto se garantiza que la minimización o maximización de la función objetivo continúe descendiendo o subiendo respectivamente, o en el peor de los casos se mantenga la misma que en la generación anterior hasta que llegue un individuo mejor adaptado y minimice más la función.



*Figura 3.6 Clonación de un individuo para un caso tipo viga.*

### 3.6 Algoritmo Genético.

El objetivo principal del AG es la detección de daño en estructuras mediante la creación de individuos implementando los operadores genéticos para generar casos hipotéticos de daño, obteniendo la respuesta dinámica y comparando esta respuesta con la respuesta dinámica del modelo de EF de la estructura del caso con daño con la ecuación de la función de mínimos cuadrados para obtener el error entre las respuestas. Con este error el AG obtiene la aptitud de cada uno de los individuos de la población, identificando así, los individuos aptos. Este proceso es iterativo, el cual finalizara al terminar un número determinado de generaciones. El lenguaje de programación para el diseño del AG de detección de daño en estructuras es FORTRAN (FORmula TRANslator).

En la Figura 3.7 se muestra la primera fase del diagrama de flujo del AG para la detección de daño. En esta primera fase mediante el monitoreo de la estructura a analizar, se obtiene su respuesta dinámica inicial, la cual será considerada como una condición de la estructura sin daño. Al transcurrir un tiempo determinado, se vuelva a analizar la estructura y se obtiene su respuesta dinámica, la cual será evaluada respecto a la respuesta sin daño mediante la función de mínimos cuadrados (Ecuación 3.1). Si el resultado de la función es igual a cero, se considera una estructura sana, es decir, no presenta daño alguno. De lo contrario si no es igual a cero, se determina que existe un cambio en los parámetros estructurales, lo cual entendemos como un deterioro estructural (daño). Una vez determinada la existencia de daño, se da paso a la segunda fase del AG (Figura 3.8).

En esta segunda fase se da inicio a la búsqueda de daño. Esta búsqueda comienza a partir de la respuesta dinámica con daño. Es aquí cuando inicia el trabajo del AG, lo primero que hace es generar una primera población de un determinado número (N) de individuos de forma aleatoria, estos individuos creados aleatoriamente son modelos de EF de la estructura analizada diseñados con el uso del software Q.E.D., los cuales presentan posibles casos de daño, con características de daño determinadas (extensión, ubicación y magnitud), estos cambios serán implementados en el código genético de cada individuo, es decir, en el archivo de salida de

Q.E.D, el cual, contiene toda la información de la estructura: número de elementos finitos, número de nodos, condiciones de frontera, tipos de carga, tipos de material y propiedades de los materiales.

El siguiente paso, es la obtención de la respuesta dinámica de cada uno de los individuos. El AG abre y ejecuta el software StaDyn para obtener la respuesta dinámica del individuo, el cual es compatible con los modelos de EF de Q.E.D. ya que son de la misma familia de software. Después se evalúan las respuestas dinámicas de los individuos respecto a la respuesta con daño, obteniendo con esto la aptitud de cada individuo y pudiendo clasificarlos según su desempeño. Esta clasificación se da de una manera muy sencilla: los individuos con un error menor, es decir, más cercano a cero, serán los más aptos.

Una vez clasificados, el AG ejecuta los operadores genéticos. El primero es la **selección**, el cual escoge los individuos que serán progenitores de los nuevos individuos, la selección actúa en cada uno de los demás operadores genéticos. En la selección se divide en un determinado porcentaje la población total, el porcentaje será de los más aptos, aptos y no aptos individuos. Los malos individuos, es decir, los no aptos serán descartados para generar nuevas poblaciones. El porcentaje más alto de seleccionados se dará con los mejores individuos, es decir, los más aptos y aptos. Después se ejecuta cada uno de los operadores genéticos utilizados (clonación, mutación, combinación, permutación y regeneración) para asegurar la diversidad de las poblaciones siguientes y el no centrar la búsqueda en mínimos locales.

Este proceso es de forma iterativa, se crearan poblaciones nuevas y evolucionadas hasta un numero de generaciones (M) determinado.

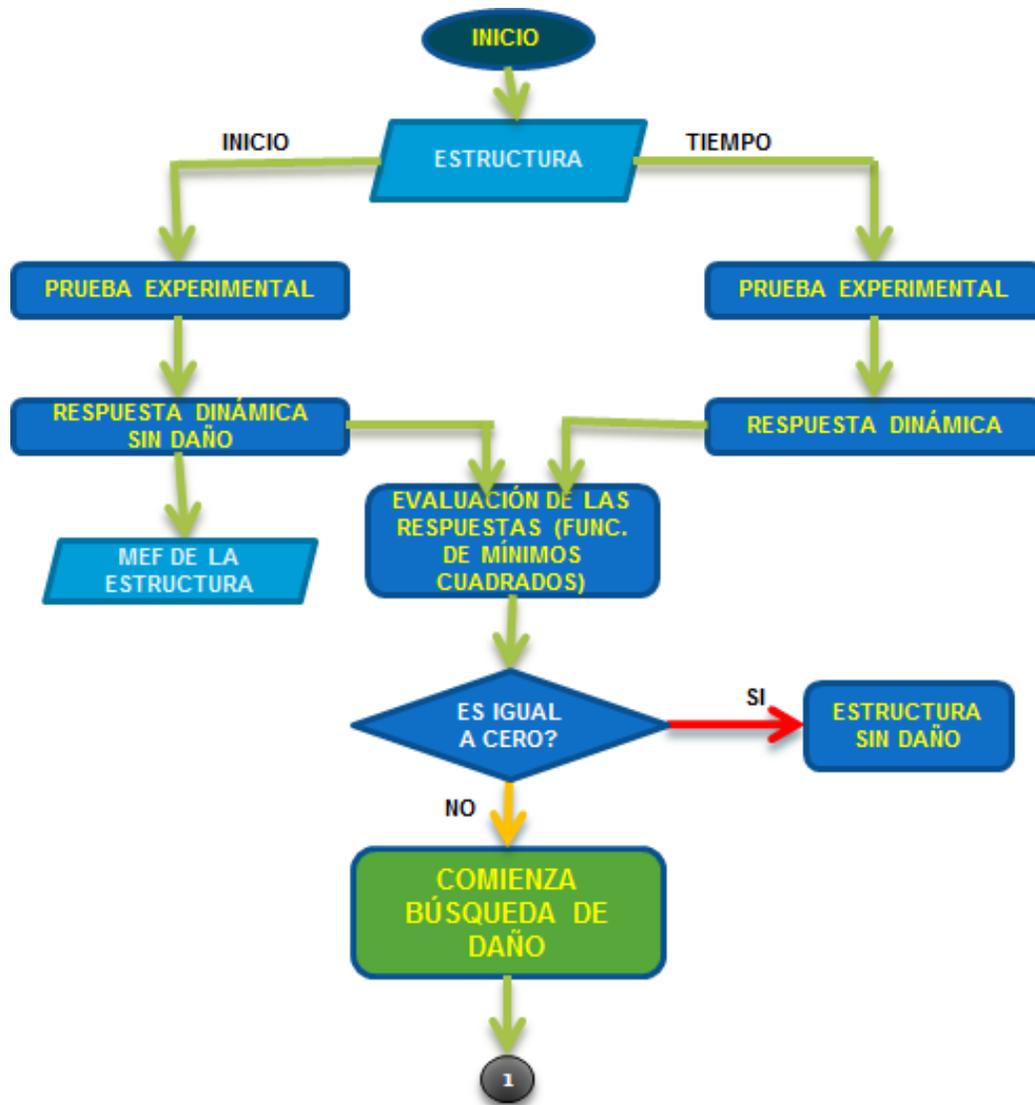


Figura 3.7 Diagrama de flujo del Algoritmo Genético (primera fase).

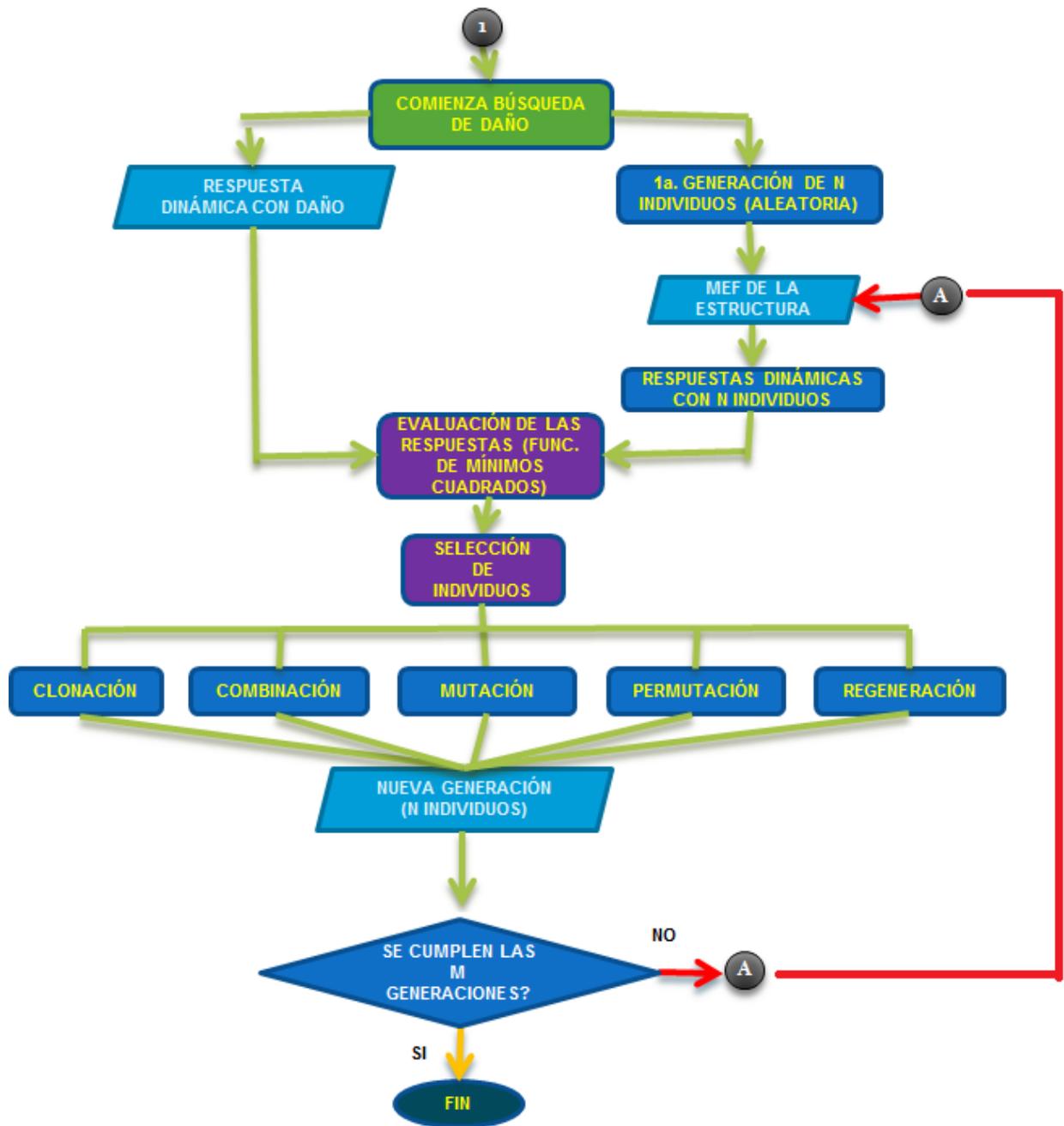


Figura 3.8 Diagrama de flujo del Algoritmo Genético (Segunda fase).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN (APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN ESTRUCTURAS).

El diseño de pruebas de convergencia son de gran importancia, ya que de ellas depende el examinar y probar la eficiencia del AG. Las pruebas consisten en la medición de la respuesta de los modelos de elemento finito por efecto de una fuerza de excitación y condición conocida.

Dichas pruebas se realizan mediante el empleo de modelos de elemento finito (EF). Se crean diferentes modelos virtuales de estructuras con variables y propiedades estructurales conocidas: longitud, área sección transversal, condiciones de frontera, tipo de material, masa, densidad, módulo de elasticidad y rigidez, tamaño o área del elemento finito y geometría.

Habiendo creado el modelo de EF de la estructura, se prosigue a diseñar modelos de una misma estructura con daños conocidos para probar la convergencia del AG. Para nuestro caso de estudio solo se consideraron como daños los cambios en la sección transversal del elemento estructural, es decir, una disminución en el área de la sección transversal inicial de la estructura. Cabe aclarar, que este deterioro no es el único que puede ser analizado, se puede también considerar cambios en alguno de los parámetros estructurales mencionados en capítulos anteriores.

Los modelos de EF se realizaron en el Software de elemento finito Q.E.D. (Quod Erat Demonstrandum) que se compone de tres módulos separados:

- El primero corresponde al pre-procesamiento donde se crea el modelo de EF, definiendo en esta parte la geometría, las condiciones de frontera, las cargas aplicadas y el mallado de la estructura.
- El segundo módulo es el procesamiento, donde se calcula la respuesta dinámica del modelo. En este caso utilizaremos el software StaDyn (Static and Dynamic analysis)

para obtener las respuestas dinámicas de los individuos.

- El tercer y último módulo se conoce como post-procesamiento y permite el análisis de resultados visualizados de diferentes maneras, por ejemplo: formas deformadas, modos de vibración, etc.

Utilizando estos módulos se puede realizar un análisis para obtener la respuesta dinámica de los modelos diseñados. La forma en que Q.E.D. genera la información es mediante datos numéricos, los cuales se pueden procesar y obtener señales en el dominio del tiempo y frecuencia. Este proceso mediante el cual se obtiene la respuesta dinámica de un sistema, es equivalente, a poner físicamente sensores en la estructura o en el elemento estructural analizado, es decir, se obtienen la respuesta dinámica en ciertos puntos de la estructura “sensores”, determinados al inicio del análisis.

Los modelos se pueden utilizar para el monitoreo estructural, la detección y evaluación de daño asociado con cambios en los parámetros estructurales y que se pueden inferir a través de las mediciones experimentales que se generan mediante el AG.

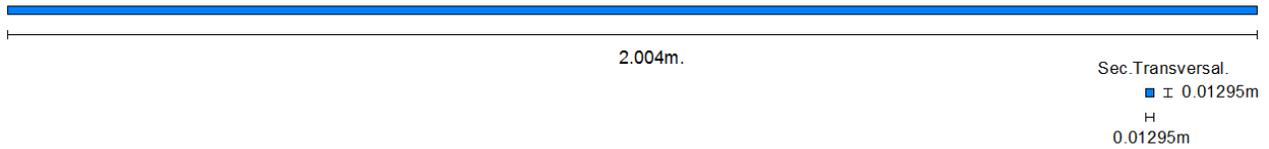
Se prueba el AG con distintos modelos de EF, para las primeras pruebas se opta por un modelo de un elemento estructural tipo barra, con el fin de simplificar el número de variables, reduciendo el número de elementos finitos por individuo y así acortar el tiempo de iteración del AG, y tener resultados en corto tiempo, para poder observar como su comportamiento y realizar los cambios en la programación del AG para mejorar su convergencia.

Habiendo experimentado y obteniendo los resultados del modelo tipo viga, se elevó el grado de complejidad del modelo para probar el AG, se realizan las pruebas en un modelo de un marco estructural. Para así poder ver el comportamiento del AG en un modelo con mayor número de elementos finitos, lo cual eleva el grado de dificultad para la detección de daño.

#### 4.1 Detección de daño en un elemento estructural tipo barra.

##### 4.1.1 Modelo de Elemento Finito de una barra.

El modelo corresponde a una barra de aluminio que tiene una longitud de 2.004 metros y una sección transversal cuadrada de 0.01295 metros de lado (ver Tabla 4-1)



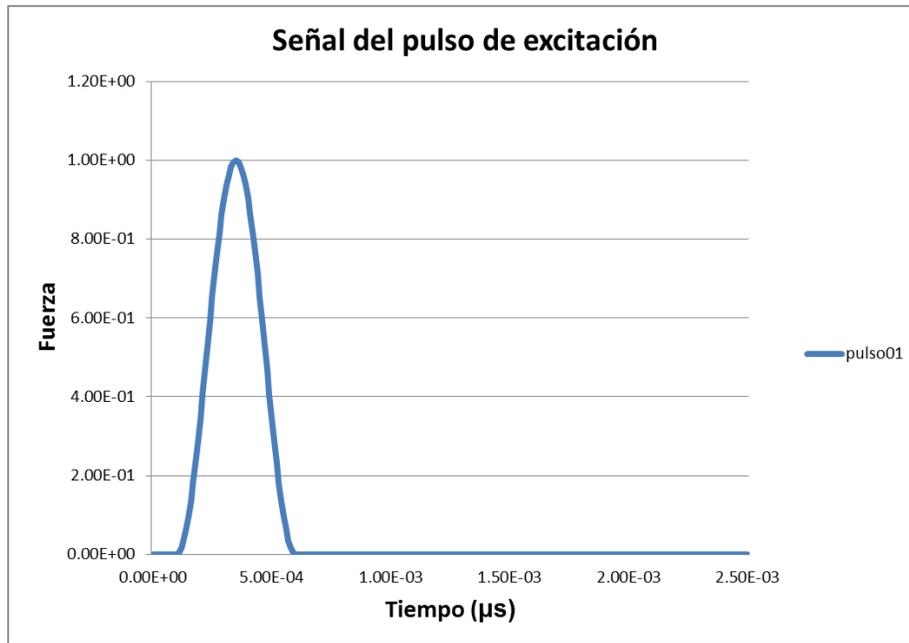
*Figura 4.1 Dimensiones de la barra para el caso experimental.*

Las propiedades del material con que se diseñó el modelo de la barra se describen en la Tabla 4-1. El modelo de la barra tiene condiciones de frontera aisladas, se idealizan los apoyos libres. Con esto se disminuye las reflexiones de onda y así no inferir en el proceso de detección de daño.

*Tabla 4-1 Propiedades del material usado en la barra.*

PROPIEDADES DEL ALUMINIO		
<b>Módulo de Elasticidad</b>	<b>E</b>	70 Gpa
<b>Densidad</b>	<b><math>\rho</math></b>	2710 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Poisson</b>	<b><math>\nu</math></b>	0.33

Las pruebas consisten en tener distintos escenarios de daño, obteniendo las señales de respuesta dinámica ante un pulso de excitación (impacto) determinado, utilizando un arreglo de sensores en pares, los cuales detectarían las señales emitidas por una fuerza unitaria de excitación (Figura 4.2).



*Figura 4.2 Fuerza unitaria de excitación.*

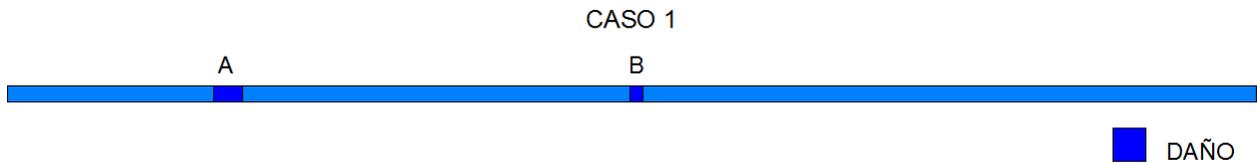
La barra se discretiza en 600 elementos finitos, numerados del 1 al 600 de izquierda a derecha, creando así 601 nodos en la barra. Los seis sensores (puntos donde se registran las respuestas dinámicas) se encuentran en los siguientes nodos: 88, 173, 258, 343, 428 y 513. El impacto del pulso se genera a un tercio de la barra, en el nodo 200.

A continuación se presentan los casos analizados con diferentes tipos de daño y diferentes porcentajes de los operadores genéticos.

#### 4.1.2 Casos de daño.

##### 4.1.2.1 Caso 1.

La barra presenta dos daños puntuales como se muestra en la Figura 4.3 , en la Tabla 4-2 se observan las características de los daños para el caso 1.



*Figura 4.3 Representación gráfica del Caso 1*

*Tabla 4-2 Daños para el caso 1*

Daños del caso1	Ubicación (nodos)	Cambio de ST.
<b>A</b>	100-107	10%
<b>B</b>	300-304	15%

Se realizan pruebas con distintos porcentajes de los operadores genéticos, para observar como es la convergencia dependiendo de qué operadores tengan mayor porcentaje y si presentan algunas restricciones como es el número de elementos dañados, así como la magnitud máxima del daño. Para todos los casos de daño se realizaron dos pruebas una con mayor porcentaje de permutación y otra donde el porcentaje mayor corresponde al operador de combinación.

- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-3. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **combinación**, la combinación superior se toma de un porcentaje de los mejores individuos, y la inferior de un porcentaje de los individuos catalogados como buenos. Con la combinación inferior se mantiene la diversidad en las siguientes generaciones.

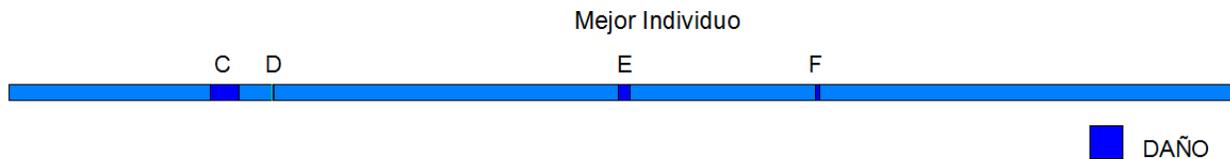
*Tabla 4-3 Prueba 1- Caso1.*

Restricciones de la Prueba	
<b>% máximo de deterioro</b>	20%
<b>Extensión del daño</b>	1-10 elementos
<b>Individuos por generación</b>	200
<b>Generaciones</b>	200
<b>% de Clonación</b>	6%
<b>% de Combinación superior</b>	<b>32%</b>
<b>% de Combinación inferior</b>	<b>5%</b>
<b>% de Permutación</b>	30%
<b>% de Regeneración</b>	27%

El mejor individuo de la generación 200 se representa gráficamente en la Figura 4.4, el cual presenta cuatro daños (Tabla 4-4). Se puede observar que la convergencia es aceptable, ya que el AG localiza perfectamente los daños A y B del caso 1, los cuales están representados como C y E.

*Tabla 4-4 Daños del mejor individuo de la prueba 1*

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de ST.
<b>C</b>	<b>100-106</b>	<b>10.57%</b>
<b>D</b>	110-111	5.29%
<b>E</b>	<b>300-304</b>	<b>14.97%</b>
<b>F</b>	477-478	0.52%



*Figura 4.4 Mejor individuo de la prueba 1 del caso 1.*

Como se puede observar y comparando los daños del caso 1 (Tabla 4-2) con los daños del mejor individuo (Tabla 4-4) se detectaron perfectamente los daños del caso 1 (daños A y B):

- El daño C tiene las mismas características que el daño A, solo con una variación de más 0.57 % de cambio en la sección transversal, la cual es mínima. La ubicación del daño fue casi perfecta solo tuvo un elemento menos que el buscado.
- El daño B fue encontrado en el mejor individuo (daño E) con una ubicación exacta y con solo un porcentaje 0.03% menor que el real.
- Los daños D y F fueron generados por el AG los cuales son despreciables ya que su extensión es de solo un elemento finito dañado y el cambio en la sección transversal tiene un porcentaje muy pequeño.

En la Figura 4.5 se muestra el grafico que plasma los errores obtenidos mediante la función de mínimos cuadrados de los mejores individuos para cada generación. Como se observa la búsqueda de buenas soluciones empieza en un punto alto, es decir, la convergencia es poca o nula. Después, conforme comienzan a entrar en acción los operadores genéticos, la diferencia entre las respuestas dinámicas va disminuyendo, lo que significa que mejores soluciones se han encontrado.

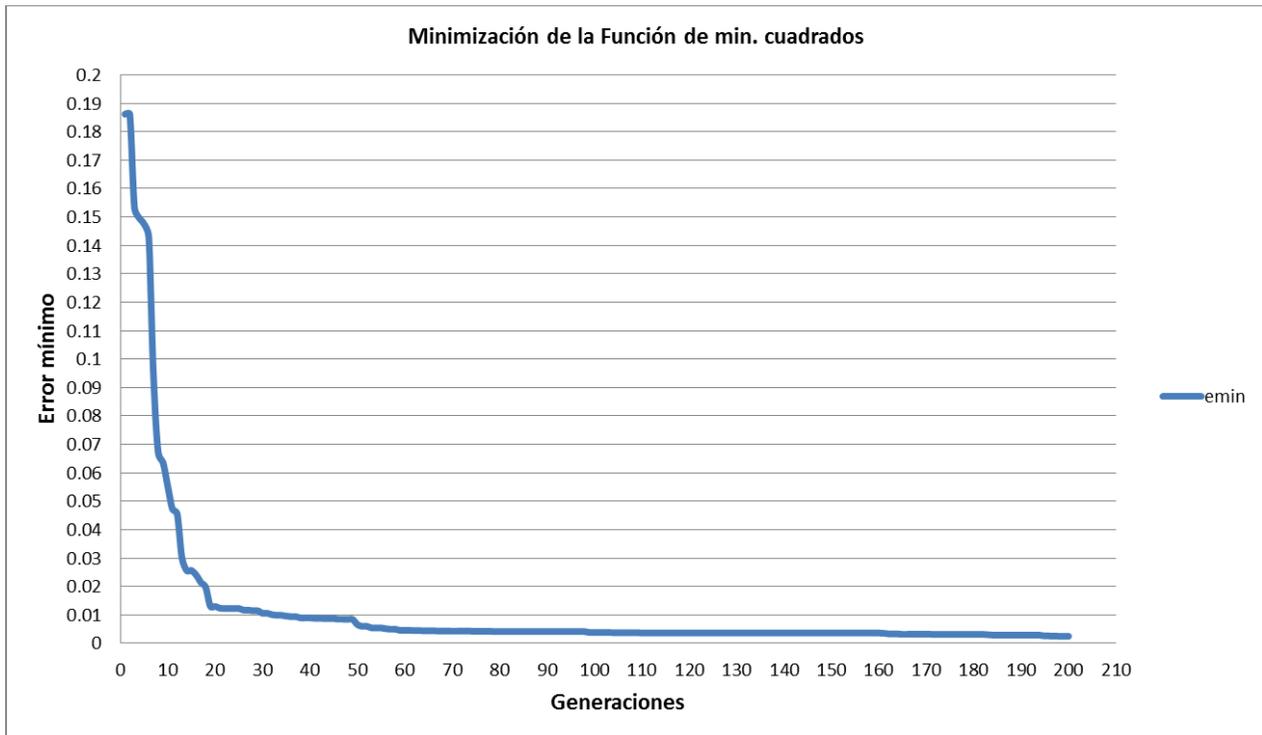
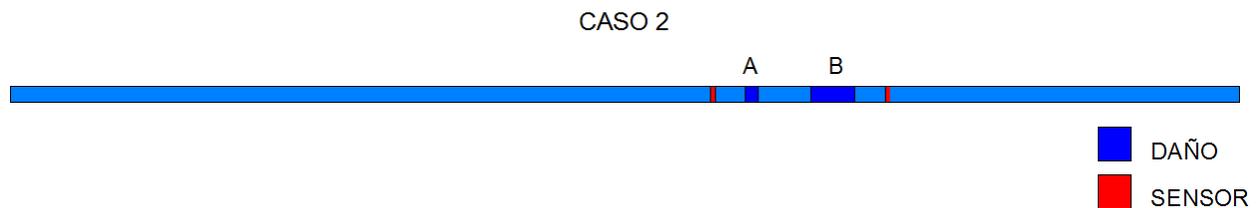


Figura 4.5 Grafico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso 1.

#### 4.1.2.2 Caso 2.

La barra presenta dos daños puntuales como se muestra en la Figura 4.6, en la Tabla 4-5 se observan las características de los daños para el caso 2. Se ubican los daños relativamente cerca uno de otro y entre dos sensores (sensores en nodos 343 y 428), para observar si la cercanía y la ubicación de los daños afectan a la convergencia del AG.



*Figura 4.6 Representación gráfica del Caso2*

*Tabla 4-5 Daños para el caso 2*

Daños del caso1	Ubicación (nodos)	Cambio de ST.
<b>A</b>	360-362	30%
<b>B</b>	392-399	10%

- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-6. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **permutación**.

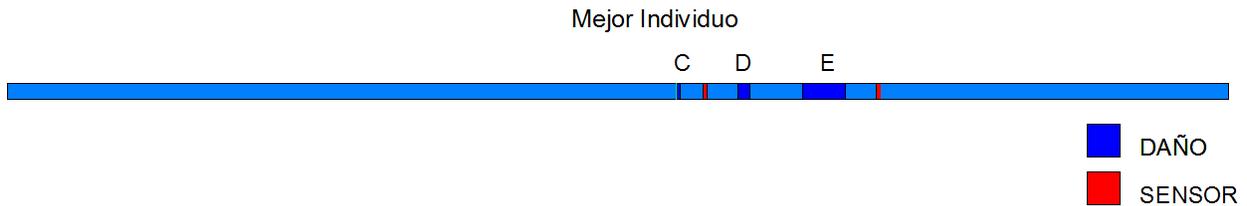
*Tabla 4-6 Prueba 1- Caso2.*

Restricciones de la Prueba	
<b>% máximo de deterioro</b>	50%
<b>Extensión del daño</b>	1-10 elementos
<b>Individuos por generación</b>	200
<b>Generaciones</b>	200
<b>% de Clonación</b>	6%
<b>% de Combinación superior</b>	15%
<b>% de Combinación inferior</b>	5%
<b>% de Permutación</b>	<b>45%</b>
<b>% de Regeneración</b>	29%

El mejor individuo de la generación 200 se representa gráficamente en la Figura 4.7, el cual presenta cuatro daños (Tabla 4-7). Se puede observar que la convergencia es aceptable, ya que el AG localiza perfectamente los daños A y B del caso 2, los cuales están representados como C y E.

*Tabla 4-7 Daños del mejor individuo de la prueba 1*

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de ST.
<b>C</b>	331-332	7.64%
<b>D</b>	<b>359-360</b>	<b>36.56%</b>
<b>E</b>	<b>394-399</b>	<b>9.94%</b>



*Figura 4.7 Mejor individuo de la prueba 1 del caso 2.*

Como se puede observar y comparando los daños del caso 2 (Tabla 4-5) con los daños del mejor individuo (Tabla 4-7) se detectó la ubicación los daños del caso 2 (daños A y B):

- El daño D tiene las mismas características que el daño A, solo con una variación de más 6.56 % de cambio en la sección transversal, la cual es mínima. La ubicación del daño fue casi perfecta solo tuvo un elemento menos que el buscado y un desfase hacia la izquierda de dos elementos.
- El daño B fue encontrado en el mejor individuo (daño E) con una ubicación casi exacta, solo faltaron dos elementos dañados. La magnitud encontrada tiene solo un porcentaje 0.06% menor que el real.
- El daño C fue generado por el AG el cual es despreciable ya que su extensión es de solo un elemento finito dañado y el cambio en la sección transversal tiene un porcentaje pequeño.

En la Figura 4.8 se muestra el grafico que plasma la diferencia entre las respuestas dinámicas obtenidas mediante la función de mínimos cuadrados de los mejores individuos para cada generación. El grafico plasma la menor diferencia de cada población generada. Como se observa la búsqueda de buenas soluciones empieza en un punto alto, es decir, la convergencia es poca o nula. Después, conforme comienzan a entrar en acción los operadores genéticos, la diferencia entre las respuestas dinámicas va disminuyendo, lo que significa que mejores soluciones se han encontrado.

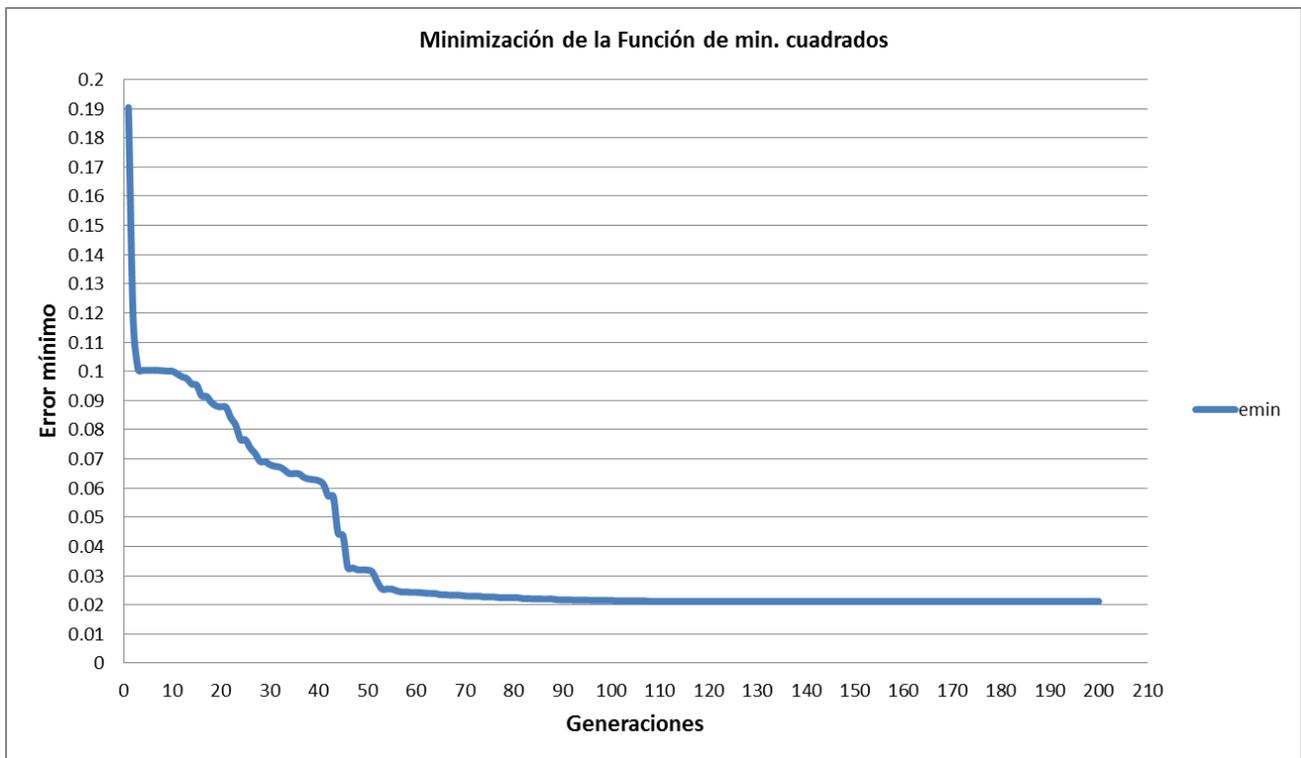


Figura 4.8 Grafico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso 2.



- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-6. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **permutación**. Se utilizan 260 generaciones debido a que el caso3 es complicado por el arreglo de daños que presenta y puede engañar al AG. Así tendrá más oportunidad de encontrar una buena solución.

*Tabla 4-9 Prueba 1- Caso3.*

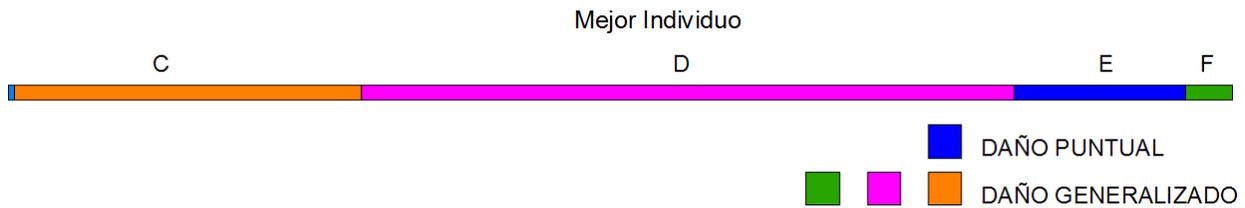
Restricciones de la Prueba	
<b>% máximo de deterioro</b>	50%
<b>Extensión del daño</b>	Libre (1-600)
<b>Individuos por generación</b>	200
<b>Generaciones</b>	260
<b>% de Clonación</b>	6%
<b>% de Combinación superior</b>	15%
<b>% de Combinación inferior</b>	5%
<b>% de Permutación</b>	<b>45%</b>
<b>% de Regeneración</b>	29%

El mejor individuo de la generación 260 se representa gráficamente en la Figura 4.10, el cual presenta cuatro daños (Figura 4.10). Se puede observar que la convergencia es aceptable, ya que el AG localiza perfectamente Los daños a buscar A y B del caso 3, presentan daños generalizados, los cuales, al quitar la restricción de la extensión del daño, el AG los localiza muy

bien, están representados como C, D, E, F.

*Tabla 4-10 Daños del mejor individuo de la prueba 1*

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de ST.
<b>C</b>	3-174	10.81%
<b>D</b>	174-497	9.87%
<b>E</b>	<b>497-575</b>	<b>36.17%</b>
<b>F</b>	575-600	50.73%



*Figura 4.10 Mejor individuo de la prueba 1 del caso 3.*

Como se puede observar y comparando los daños del caso 3 (Tabla 4-8) con los daños del mejor individuo (Figura 4.10) se detectaron los daños del caso 3:

- Se localiza el daño puntual E con una extensión mayor que la del caso 3, la magnitud es muy cercana a la exacta, se generan los demás daños para que converja la solución. El daño F presenta un cambio considerable de la sección transversal, en este caso converge la ubicación, el caso 3 es una tarea difícil para el AG pero arrojo buenos resultados, ya que la posibilidad de tener diferentes daños era muy grande.
- Los daños generalizados, generados por el AG, tienen una convergencia casi exacta, con

magnitud y ubicación muy similar. Lo cual es un buen resultado

En la Figura 4.11 se muestra el grafico que plasma los errores obtenidos mediante la función de mínimos cuadrados de los mejores individuos para cada generación. Como se observa la búsqueda de buenas soluciones empieza en un punto alto, es decir, la convergencia es poca o nula. Después, conforme comienzan a entrar en acción los operadores genéticos, el error va disminuyendo, lo que significa que mejores soluciones se han encontrado. También se observa que el error comienza con un valor alto de más de 1.5, pero comienza a minimizarse a partir de la generación 60. Después su minimización es muy baja, hasta llegar a la última generación.

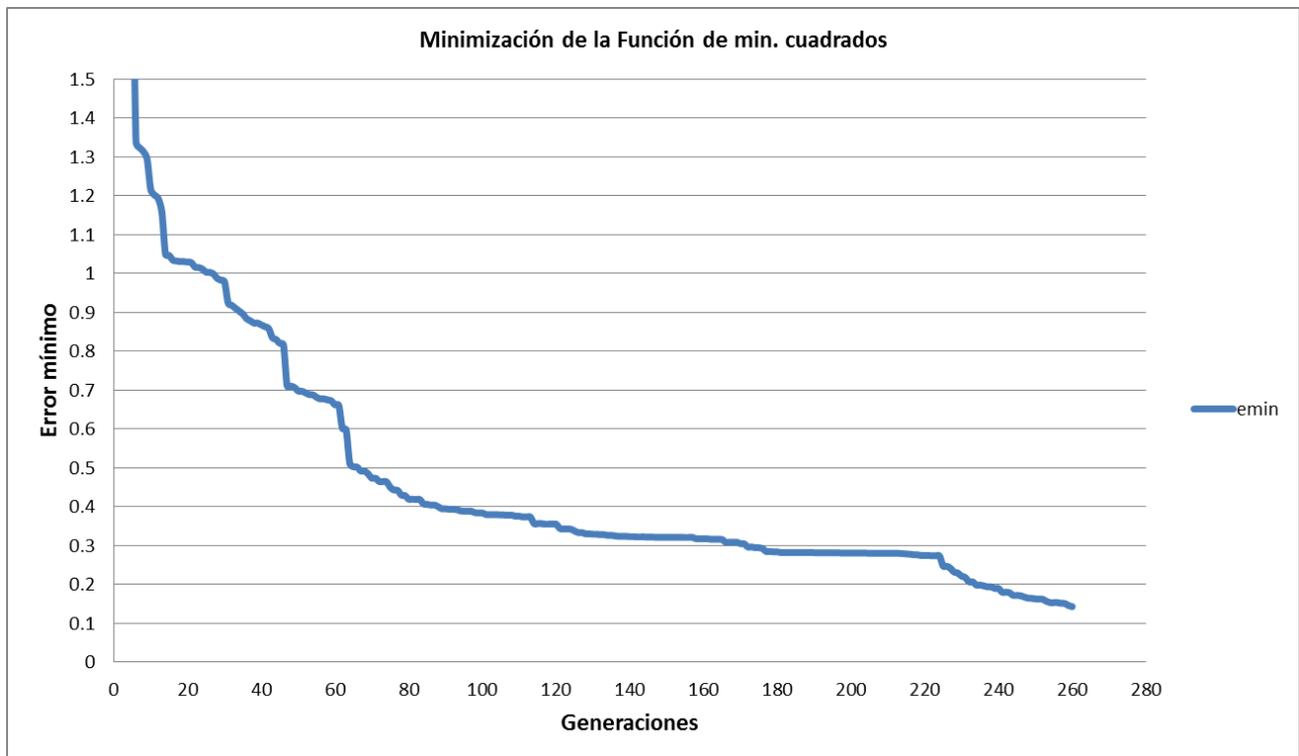
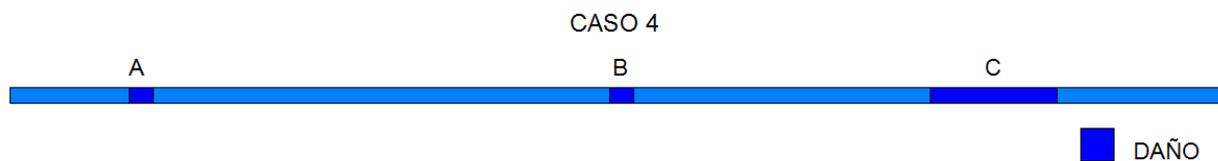


Figura 4.11 Grafico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso 3.

#### 4.1.2.4 Caso 4.

La barra presenta tres daños puntuales como se muestra en la Figura 4.12, en la Tabla 4-11 se observan las características de los daños para el caso 4. Este caso presenta dificultad para el AG, ya que las extensiones de los daños son muy distintas, para los daños A y B, son extensiones pequeñas y el daño C tiene extensión grande de 43 elementos dañados.



*Figura 4.12 Representación grafica del Caso4*

*Tabla 4-11 Daños para el caso 4*

Daños del caso1	Ubicación (nodos)	Cambio de ST.
<b>A</b>	60-66	12%
<b>B</b>	298-304	8%
<b>C</b>	457-500	15%

- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-12. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **permutación**.

*Tabla 4-12 Prueba 1- Caso4.*

Restricciones de la Prueba	
<b>% máximo de deterioro</b>	20%
<b>Extensión del daño</b>	1-10 elementos
<b>Individuos por generación</b>	200
<b>Generaciones</b>	200
<b>% de Clonación</b>	6%
<b>% de Combinación superior</b>	15%
<b>% de Combinación inferior</b>	5%
<b>% de Permutación</b>	<b>45%</b>
<b>% de Regeneración</b>	29%

El mejor individuo de la generación 200 se representa gráficamente en la Figura 4.13 , el cual presenta siete daños (Tabla 4-13).

*Tabla 4-13 Daños del mejor individuo de la prueba 1*

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de ST.
<b>D</b>	<b>62-65</b>	<b>16.95%</b>
<b>E</b>	<b>298-303</b>	<b>9.13%</b>
<b>F</b>	<b>461-467</b>	<b>19.25%</b>
<b>G</b>	<b>487-490</b>	<b>20.66%</b>
H	525-529	17.72%
I	542-549	20.26%
J	592-594	14.00%



*Figura 4.13 Mejor individuo de la prueba 1 del caso 4.*

Como se puede observar y comparando los daños del caso 4 (Tabla 4-11) con los daños del mejor individuo (Tabla 4-13) se detectaron los daños del caso 4 (daños A, B, C) generando tres daños (H, I, J) que no corresponden a los daños reales pero son de extensión mínima; los daños F y G ocupan el lugar del daño C con una magnitud muy cercana a la real.

En la Figura 4.14Figura 4.8 se muestra el grafico que plasma los errores obtenidos mediante la función de mínimos cuadrados de los mejores individuos para cada generación. Como se observa la búsqueda de buenas soluciones empieza en un punto alto, es decir, la convergencia es poca o nula. Después, conforme comienzan a entrar en acción los operadores genéticos, el error va disminuyendo, lo que significa que mejores soluciones se han encontrado. Llegando a la generación 90, la minimización es muy sutil hasta llegar a la última generación.

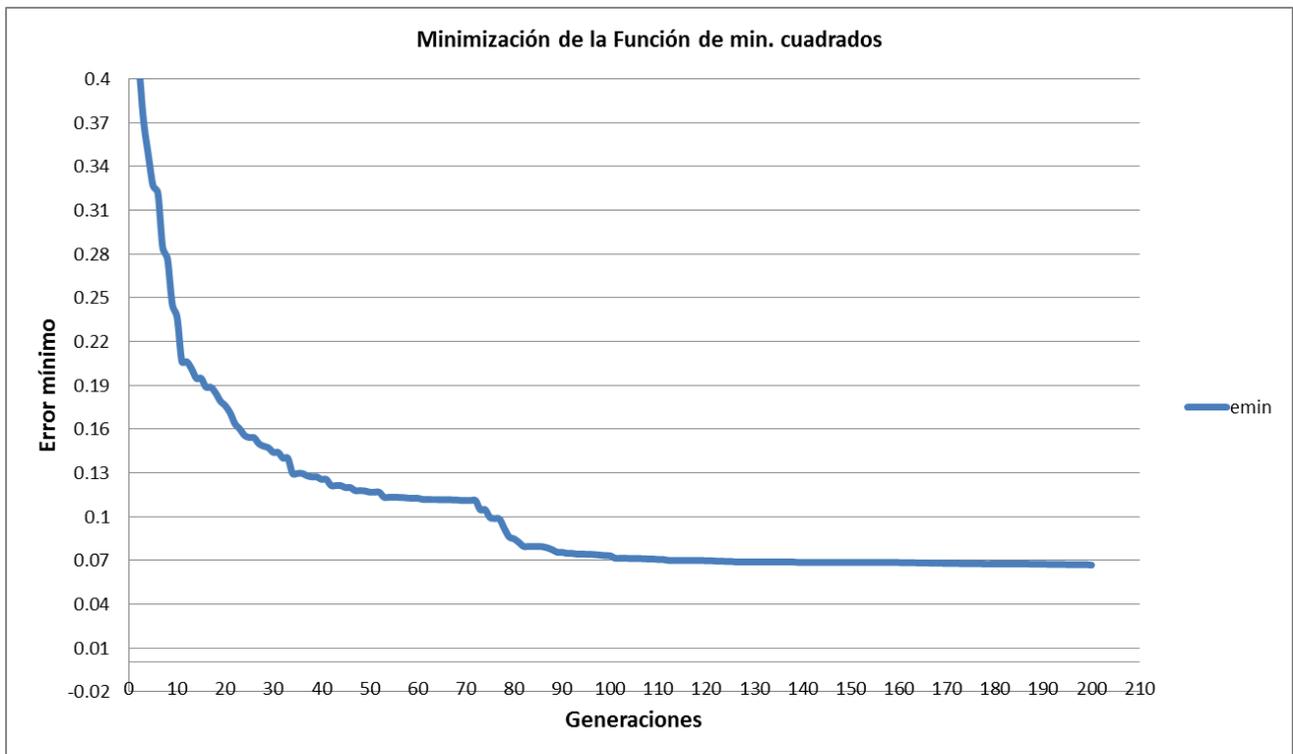
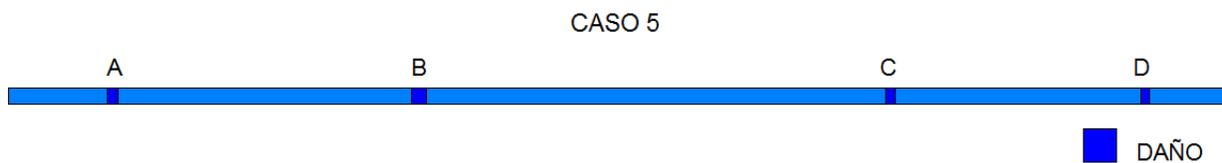


Figura 4.14 Grafico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso 4.

#### 4.1.2.5 Caso 5.

La barra presenta cuatro daños puntuales como se muestra en la Figura 4.15, en la Tabla 4-14 se observan las características de los daños para el caso 5. Este caso presenta dificultad para el AG, ya que las extensiones de los daños son pequeñas y se prueba con cuatro daños separados una distancia considerable. Otra dificultad son las magnitudes del daño ya que son distintas.



*Figura 4.15 Representación gráfica del Caso5*

*Tabla 4-14 Daños para el caso 5*

Daños del caso1	Ubicación (nodos)	Cambio de ST.
<b>A</b>	50-55	12%
<b>B</b>	200-207	30%
<b>C</b>	434-439	15%
<b>D</b>	560-565	8%

- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-15. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **permutación**. Otra variable que presentara dificultad para el AG es que se libera la extensión del daño y además se el porcentaje de deterioro es alto.

*Tabla 4-15 Prueba 1- Caso5.*

Restricciones de la Prueba	
<b>% máximo de deterioro</b>	50%
<b>Extensión del daño</b>	Libre (1-600)
<b>Individuos por generación</b>	200
<b>Generaciones</b>	260
<b>% de Clonación</b>	6%
<b>% de Combinación superior</b>	15%
<b>% de Combinación inferior</b>	5%
<b>% de Permutación</b>	<b>45%</b>
<b>% de Regeneración</b>	29%

El mejor individuo de la generación 260 se representa gráficamente en la Figura 4.16, el cual presenta cuatro daños (Tabla 4-16). Se puede observar que la convergencia es aceptable, ya que el AG localiza perfectamente los daños del caso 5, sin generar daños que no corresponden a los daños del caso, la magnitud de los daños es menor pero la ubicación es casi perfecta.

Tabla 4-16 Daños del mejor individuo de la prueba 1

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de ST.
<b>E</b>	<b>48-58</b>	<b>6.79%</b>
<b>F</b>	<b>200-208</b>	<b>29.97%</b>
<b>G</b>	<b>432-443</b>	<b>9.58%</b>
<b>H</b>	<b>560-568</b>	<b>6.53%</b>

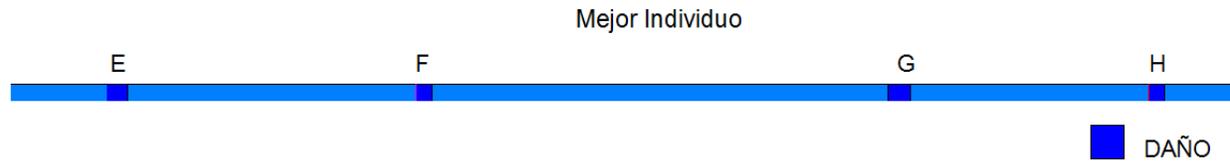


Figura 4.16 Mejor individuo de la prueba 1 del caso 5.

Como se observa el número de generaciones es de 260, ya que se libera la extensión del daño y se requiere de mayor tiempo para encontrar una mejor solución.

En la Figura 4.17Figura 4.8 se muestra el grafico que plasma los errores obtenidos mediante la función de mínimos cuadrados de los mejores individuos para cada generación. Como se observa la búsqueda de buenas soluciones empieza en un punto alto, es decir, la convergencia es poca o nula. Después, conforme comienzan a entrar en acción los operadores genéticos, el error va disminuyendo, lo que significa que mejores soluciones se han encontrado. Llegando a la generación 50, la minimización es muy sutil hasta llegar a la generación 160, donde vuelve a bajar la pendiente.



Figura 4.17 Grafico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso 5.

### 4.1.3 Análisis de resultados.

El AG se prueba para todos los casos con dos variaciones: la primera para un porcentaje mayor de combinaciones y la segunda donde las permutaciones son el operador con mayor actividad. Figura 4.8 De ambas pruebas, los resultados son excelentes, sin embargo, se tiene una mayor convergencia cuando el operador con mayor porcentaje de reproducción es el de permutación.

Cuando no se restringe la extensión de los daños, es necesario permitir que el AG genere un mayor número de iteraciones (generaciones), para permitir que tenga mayor tiempo de optimizar las respuestas y con esto la convergencia de los individuos sea mayor. Para una extensión limitada como fue el caso de algunas pruebas se utilizó un número máximo de 200

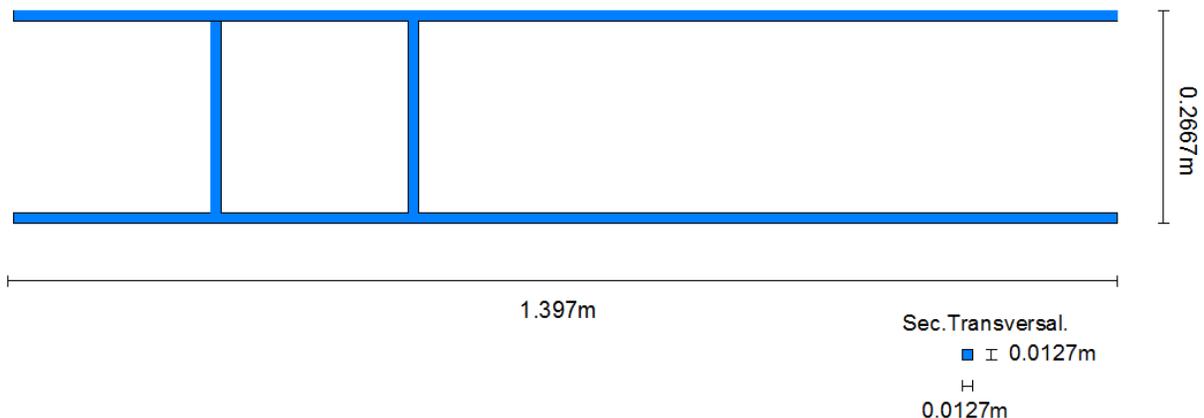
generaciones, debido a que se observó que con la mitad de estas generaciones el AG no desarrolla su total capacidad de convergencia, y un número mayor de generaciones solo aumentarían el tiempo de iteración sin obtener mejores individuos. Cuando la extensión del daño es libre se utilizó un máximo de 260 generaciones, este número fue obtenido en base a pruebas posteriores en las cuales se observó que después de este número de generaciones la capacidad de convergencia del AG disminuye.

El AG tiene buena convergencia para el caso de detección de daño en una barra, en todos las pruebas ubico perfectamente los daños de los casos de búsqueda, y la cuantificación de los mismos fue muy cercana a los mismos. Por lo tanto se detectó, ubico y cuantifico el daño para un elemento estructural tipo barra. Ahora para seguir analizando el comportamiento del AG se prueba su convergencia con un elemento estructural tipo marco, aumentando el número de elementos finitos y por lo tanto de posibilidades de daño.

## 4.2 Detección de daño en un marco estructural.

### 4.2.1 Modelo de Elemento Finito del marco estructural.

El modelo corresponde a un marco estructural de aluminio mide 1.397 m (55in) de longitud por 0.2667 m de ancho; la sección transversal de las vigas de aluminio es de  $1.6129 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  ( $0.25 \text{ in}^2$ ), ver Figura 4.18. El marco se discretiza en 4140 elementos finitos.



*Figura 4.18 Dimensiones del marco estructural para el caso experimental.*

Las propiedades del material con que se diseñó el modelo de la barra se describen en la Tabla 4-1. El modelo del marco estructural tiene condiciones de frontera aisladas, se idealizan los apoyos libres. Con esto se disminuye las reflexiones de onda y así no inferir en el proceso de detección de daño.

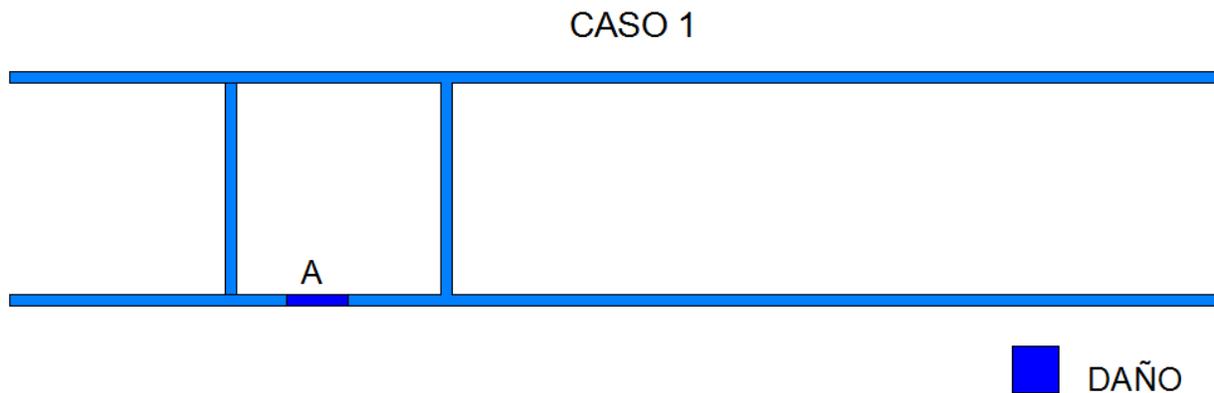
*Tabla 4-17 Propiedades del material usado para el marco estructural.*

PROPIEDADES DEL ALUMINIO		
Módulo de Elasticidad	E	70 Gpa
Densidad	$\varphi$	2710 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Poisson	$\epsilon$	0.33

#### 4.2.2 Casos de daño.

##### 4.2.2.1 Caso 1H.

El marco estructural presenta un daño puntuales como se muestra en la Figura 4.19, en la Tabla 4-18 se observan las características de los daños para el caso 1.



*Figura 4.19 Representación gráfica del Caso 1H*

*Tabla 4-18 Daños para el caso 1H*

Daños del caso1	Ubicación (nodos)	Cambio de ST.
A	1010-1025	20%

Se realizan pruebas con distintos porcentajes de los operadores genéticos, para observar como es la convergencia dependiendo de qué operadores tengan mayor porcentaje y si presentan algunas restricciones como es el número de elementos dañados, así como la magnitud máxima del daño. Para todos los casos de daño se realizaron dos pruebas una con mayor porcentaje de permutación y otra donde el porcentaje mayor corresponde al operador de combinación.

- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-19. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **combinación**.

*Tabla 4-19 Prueba 1- Caso1.*

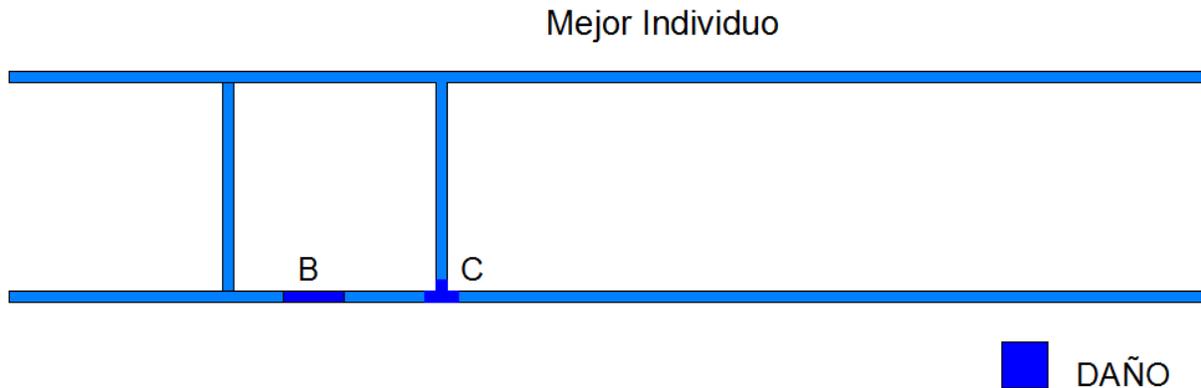
Restricciones de la Prueba	
<b>% máximo de deterioro</b>	50%
<b>Extensión del daño</b>	libre
<b>Individuos por generación</b>	200
<b>Generaciones</b>	200
<b>% de Clonación</b>	6%
<b>% de Combinación superior</b>	<b>32%</b>
<b>% de Combinación inferior</b>	<b>5%</b>
<b>% de Permutación</b>	30%

<b>% de Regeneración</b>	27%
--------------------------	-----

El mejor individuo de la generación 200 se representa gráficamente en la, el cual presenta dos daños (Tabla 4-20). Se puede observar que la convergencia es aceptable, ya que el AG localiza perfectamente el daño del caso 1, generando uno daño mas en la conexión a la derecha, lo cual es bueno, ya que la zona con deterioro es perfectamente localizada.

*Tabla 4-20 Daños del mejor individuo de la prueba 1*

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de ST.
<b>B</b>	<b>1010-1025</b>	<b>19.59%</b>
<b>C</b>	15-1644	38.29%



*Figura 4.20 Mejor individuo de la prueba 1 del caso 1H.*

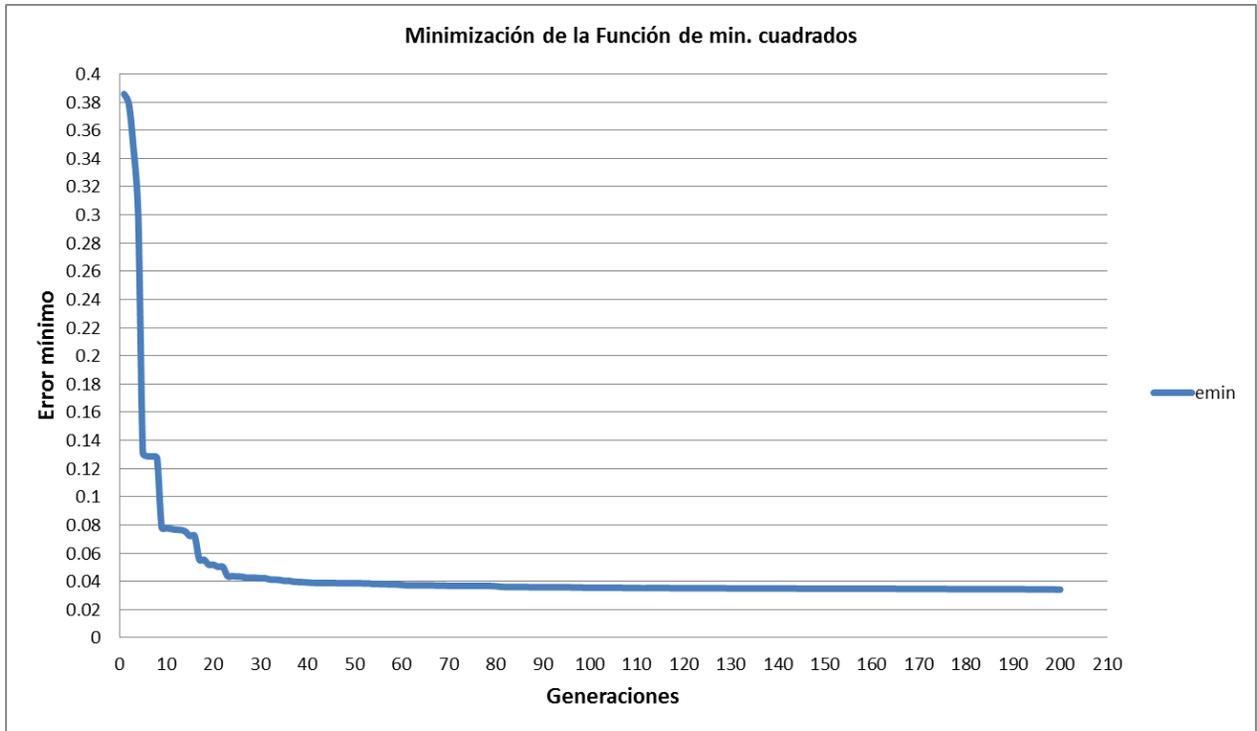


Figura 4.21 Gráfico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso 1H.

#### 4.2.2.2 Caso 2H.

El marco estructural presenta tres daño puntuales como se muestra en la Figura 4.22, en la Tabla 4-21 se observan las características de los daños para el caso 2H.

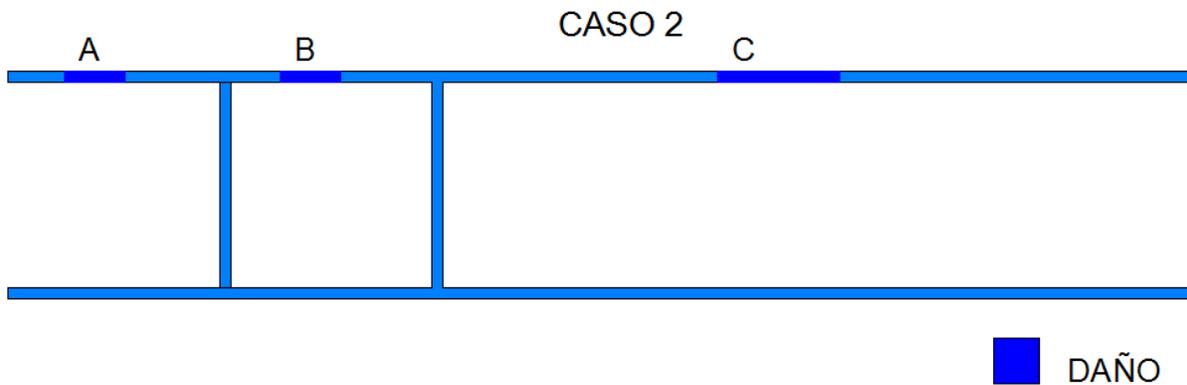


Figura 4.22 Representación grafica del Caso 2H

*Tabla 4-21 Daños para el caso2H*

Daños del caso1	Ubicación (nodos)	Cambio de ST.
<b>A</b>	3030-3049	15%
<b>B</b>	3085-3090	7%
<b>C</b>	4040-4069	18%

- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-22. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **combinación**.

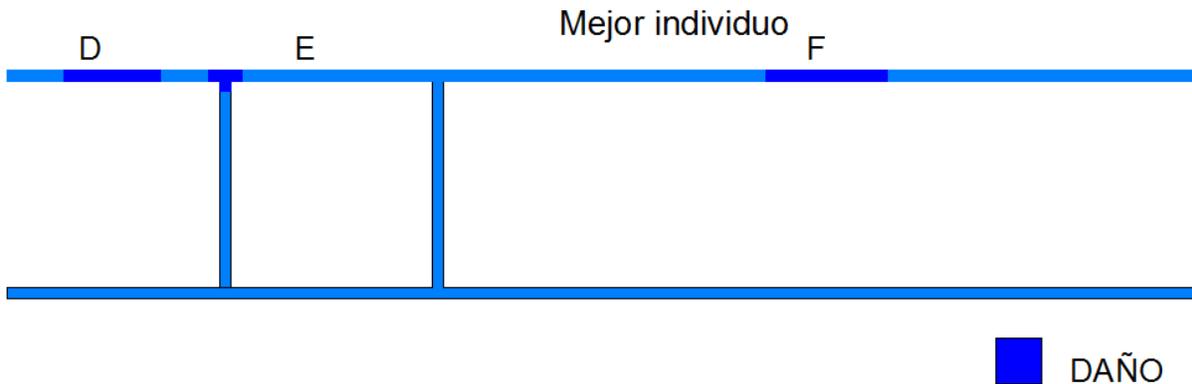
*Tabla 4-22 Prueba 1- Caso2H.*

Restricciones de la Prueba	
<b>% máximo de deterioro</b>	50%
<b>Extensión del daño</b>	libre
<b>Individuos por generación</b>	200
<b>Generaciones</b>	200
<b>% de Clonación</b>	6%
<b>% de Combinación superior</b>	<b>32%</b>
<b>% de Combinación inferior</b>	<b>5%</b>
<b>% de Permutación</b>	30%
<b>% de Regeneración</b>	27%

El mejor individuo de la generación 200 se representa gráficamente en la, el cual presenta tres daños (Tabla 4-23). Se puede observar que la convergencia es aceptable, ya que el AG localiza perfectamente los daños del caso 2H, únicamente desfasando hacia la izquierda el daño E hasta llegar a la conexión, la magnitud del deterioro es muy cercana a la real, lo cual es bueno, ya que la zona con deterioro es perfectamente localizada.

*Tabla 4-23 Daños del mejor individuo de la prueba 1*

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de ST.
<b>D</b>	<b>3027-3067</b>	<b>24.62%</b>
<b>E</b>	2487-2502	7.97%
<b>F</b>	<b>4060-4077</b>	<b>23.62%</b>



*Figura 4.23 Mejor individuo de la prueba 1 del caso 2H.*



Figura 4.24 Grafico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso2H.

### 4.2.3 Análisis de resultados.

El AG se prueba para todos los casos con dos características: la primera para una extensión del daño libre y una magnitud máxima de daño del 50%.

Se observa que en las zonas de las conexiones, el AG detecta daños, lo cual es bueno porque las zonas donde llegan varios elementos estructurales son lugares donde se tiene que prestar atención ya que los métodos de unión presentan degradación y se puede presentar una falla en esos puntos.

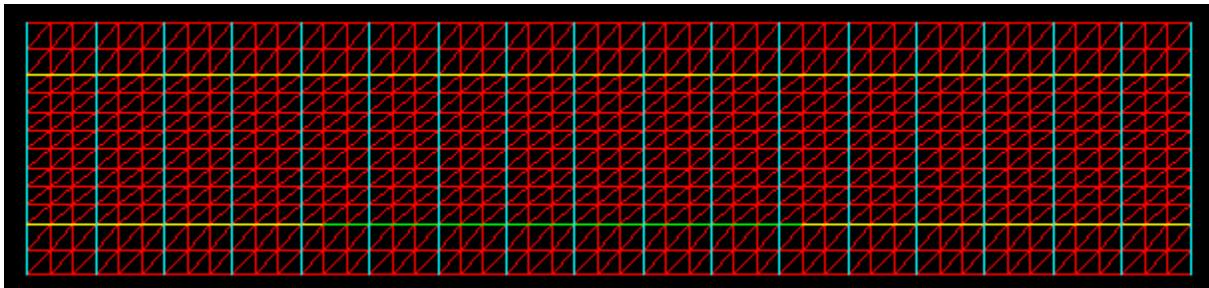
El tiempo de cómputo para iterar las 200 generaciones es muy tardado, con una computadora con procesador i7 de 4GB de RAM es de casi aproximadamente 4 días, por lo que este número de generaciones es el óptimo para llegar a una buena solución del sistema, un número mayor de generaciones tardaría mucho más y no se obtendrían mejores soluciones.

El AG tiene buena convergencia para el caso de detección de daño en un elemento estructural tipo marco, en todos las pruebas ubico perfectamente las zonas con daños, y la cuantificación de los mismos fue muy cercana a las reales. Por lo tanto se detectó, ubico y cuantifico el daño para un elemento estructural tipo marco.

### 4.3 Detección de daño en un Puente.

#### 4.3.1 Modelo de Elemento Finito de un puente.

El modelo corresponde a uno de los cuatro claros del puente Barranca Honda situado en la carretera federal 136 Calpulalpan-Texcoco, km 32.4, en los límites entre el estado de México y Tlaxcala. La superestructura está formada por dos vigas longitudinales principales IPR de acero que tienen de claro 51.00 metros, cuenta con diez y ocho travesaños transversales superiores de acero de 11.00 metros de longitud, y cuenta con una losa de concreto de 20.0 cm de espesor (ver Tabla 4-24)



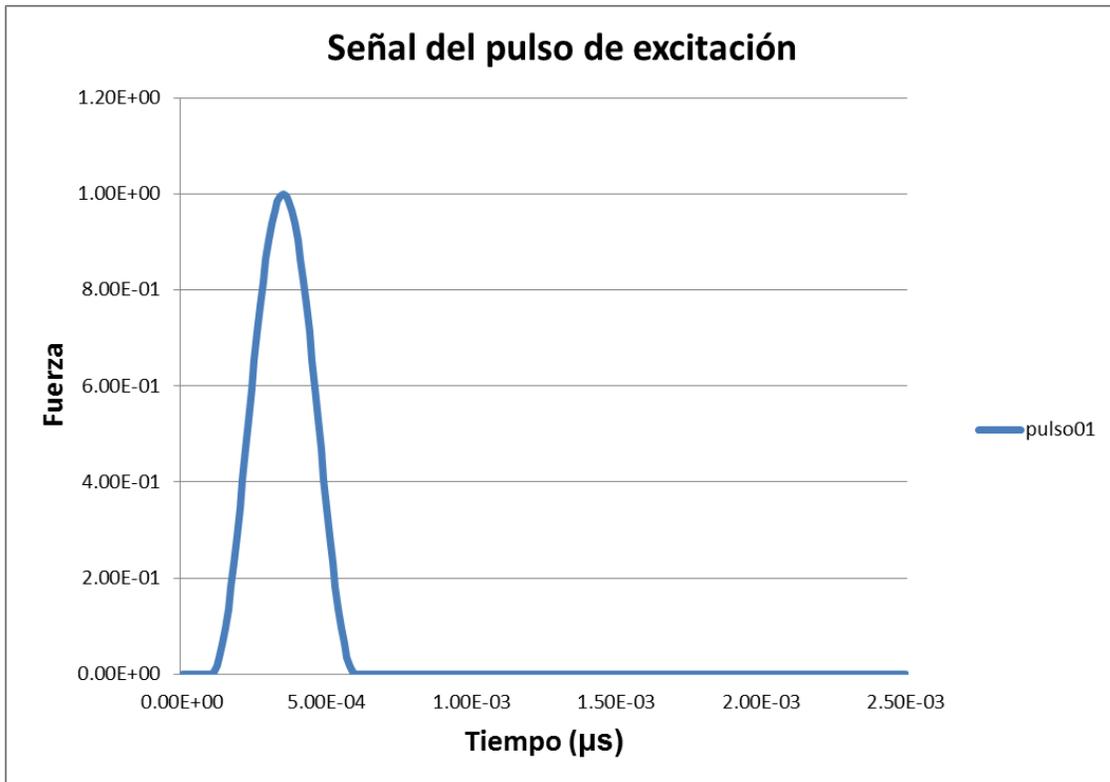
*Figura 4.25 Modelo de EF del puente.*

Las propiedades del material con que se diseñó el modelo del puente se describen en la Tabla 4-24. El modelo del puente tiene condiciones de frontera aisladas, se idealizan los apoyos libres. Con esto se disminuye las reflexiones de onda y así no inferir en el proceso de detección de daño.

*Tabla 4-24 Propiedades del material usado en el modelo del puente.*

<b>PROPIEDADES DE VIGAS TRANSVERSALES</b>		
<b>Módulo de Elasticidad</b>	<b>E</b>	235 Gpa
<b>Densidad</b>	<b><math>\varphi</math></b>	7700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Poisson</b>	<b><math>\epsilon</math></b>	0.27-0.30
<b>PROPIEDADES DE VIGAS LONGITUDINALES</b>		
<b>Módulo de Elasticidad</b>	<b>E</b>	230 Gpa
<b>Densidad</b>	<b><math>\varphi</math></b>	7700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Poisson</b>	<b><math>\epsilon</math></b>	0.27-0.30
<b>PROPIEDADES LOSA</b>		
<b>Módulo de Elasticidad</b>	<b>E</b>	60 Gpa
<b>Densidad</b>	<b><math>\varphi</math></b>	2000 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Poisson</b>	<b><math>\epsilon</math></b>	0.20

Las pruebas consisten en tener distintos escenarios de daño, obteniendo las señales de respuesta dinámica ante un pulso de excitación (impacto) determinado, utilizando un arreglo de sensores en pares, los cuales detectaran las señales emitidas por una fuerza unitaria de excitación (Figura 4.2).



*Figura 4.26 Fuerza unitaria de excitación.*

El puente se discretiza en 1542 elementos finitos, lo que implica más del doble de elementos que en los modelos anteriores, creando así 676 nodos en el modelo. Los 10 sensores (puntos donde se registran las respuestas dinámicas) se encuentran en los siguientes nodos: 87, 214, 336, 442, 560, 145, 241, 355, 456 y 570. El impacto del pulso se genera en el nodo 282. Se manejaron 12 elementos en la ancho del puente (11.00m) y 51 elementos a lo largo del puente (51.00m), se utilizaron elementos tipo placa para el tablero y tipo viga para el resto de los componentes. (Chávez, 2012)

A continuación se presentan los casos analizados con diferentes tipos de daño y diferentes porcentajes de los operadores genéticos.

### 4.3.2 Casos de daño.

#### 4.3.2.1 Caso 1.

El puente presenta un daño en una de las vigas longitudinales como se muestra en la Figura 4.3 en una línea más gruesa y de color verde, en la Tabla 4-2 se observan las características de los daños para el caso 1.

Caso 1.

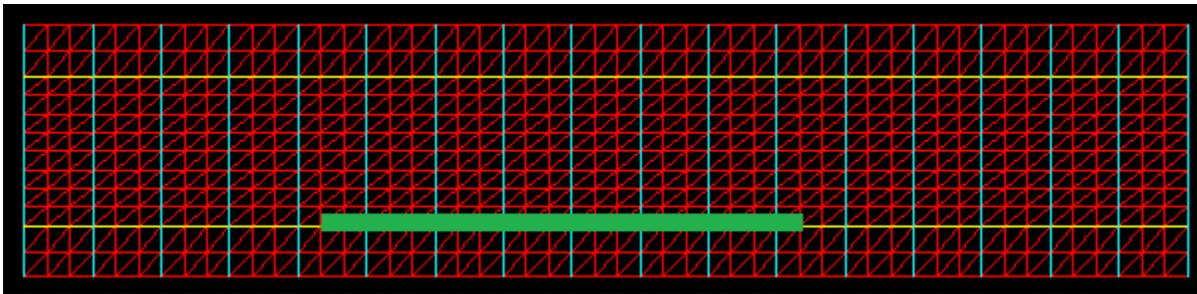


Figura 4.27 Representación gráfica del Caso 1 de daño.

Tabla 4-25 Daño para el caso 1

Daños del caso1	Ubicación (nodos)	Cambio en E.
A	1250-1270	10%

Se realizan pruebas con distintos porcentajes de los operadores genéticos, para observar como es la convergencia dependiendo de qué operadores tengan mayor porcentaje y si presentan algunas restricciones como es el número de elementos dañados, así como la magnitud máxima del daño. Para todos los casos de daño se realizaron dos pruebas una con mayor porcentaje de permutación y otra donde el porcentaje mayor corresponde al operador de combinación.

- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-3. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **regeneración** y la permutación y combinación mantienen un porcentaje similar, la combinación superior se toma de un porcentaje de los mejores individuos, y la inferior de un porcentaje de los individuos catalogados como buenos. Con la combinación inferior se mantiene la diversidad en las siguientes generaciones.

*Tabla 4-26 Prueba 1- Caso1.*

<b>Restricciones de la Prueba</b>	
<b>% máximo de deterioro</b>	70%
<b>Extensión del daño</b>	libres
<b>Individuos por generación</b>	100
<b>Generaciones</b>	200
<b>% de Clonación</b>	6%
<b>% de Combinación superior</b>	<b>25%</b>
<b>% de Combinación inferior</b>	<b>5%</b>
<b>% de Permutación</b>	30%
<b>% de Regeneración</b>	34%

El mejor individuo de la generación 200 presenta cuatro daños (Tabla 4-4). Se puede observar que la convergencia es aceptable, ya que el AG localiza el daño A del caso 1, los cuales están representados como E y F.

Tabla 4-27 Daños del mejor individuo de la prueba 1

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de E.
B	97-101	67.38%
C	703-706	62.22%
D	747-749	63.14%
<b>E</b>	<b>1247-1252</b>	<b>53.38%</b>
<b>F</b>	<b>1263-1266</b>	<b>56.50%</b>
G	1351-1360	14.43%
H	1388-1389	67.38%

Como se puede observar y comparando los daños del caso 1 (Tabla 4-2) con los daños del mejor individuo (Tabla 4-4) se detectó el daño del caso 1 (daño A):

- Los daños E y F corresponden a la ubicación del daño A, presenta una variación de más de 40 % de cambio en el módulo de Elasticidad (E). La ubicación del daño fue aceptable, solo se tuvo elementos menos que el buscado.
- Los daños B, C, D, G y H fueron generados por el AG los cuales tienen una ubicación muy cercana a la ubicación de los sensores, lo cual puede ser detectado y observado con relativa facilidad.

En la Figura 4.5 se muestra el gráfico que plasma los errores obtenidos mediante la función de mínimos cuadrados de los mejores individuos para cada generación. Como se observa la búsqueda de buenas soluciones empieza en un punto alto, es decir, la convergencia es poca o nula. Después, conforme comienzan a entrar en acción los operadores genéticos, la diferencia entre las respuestas dinámicas va disminuyendo, lo que significa que mejores soluciones se han encontrado.

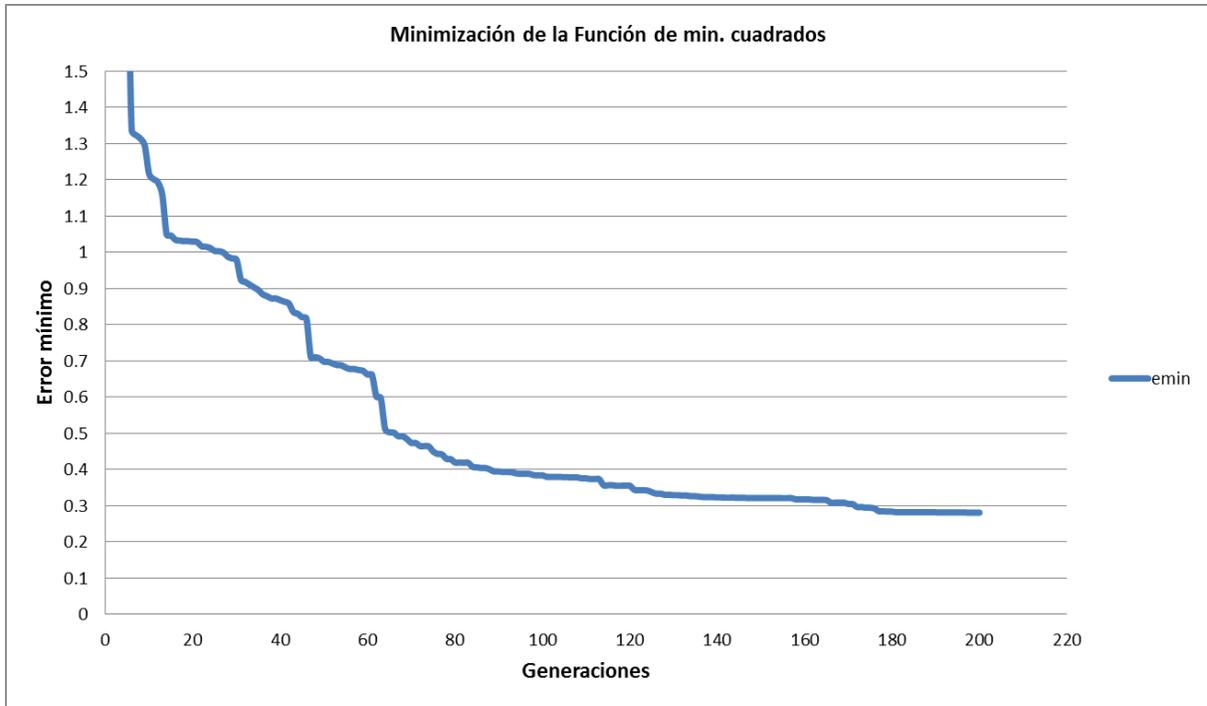


Figura 4.28 Grafico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso 1.

#### 4.3.2.2 Caso 2.

El puente presenta un daño en una de las vigas Transversales como se muestra en la Figura 4.3 en una línea más gruesa y de color verde, en la Tabla 4-2 se observan las características de los daños para el caso 2.

Caso 2.

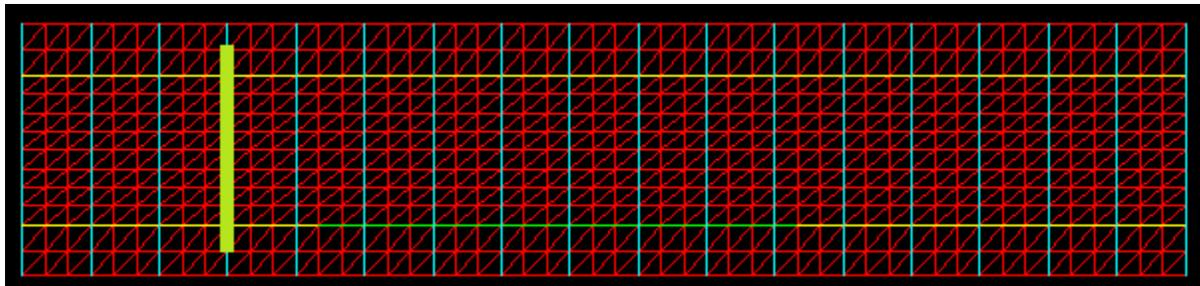


Figura 4.29 Representación gráfica del Caso 2 de daño.

Tabla 4-28 Daño para el caso 2.

Daños del caso1	Ubicación (nodos)	Cambio en E.
A	1363-1370	15%

Se realizan pruebas con distintos porcentajes de los operadores genéticos, para observar como es la convergencia dependiendo de qué operadores tengan mayor porcentaje y si presentan algunas restricciones como es el número de elementos dañados, así como la magnitud máxima del daño. Para todos los casos de daño se realizaron dos pruebas una con mayor porcentaje de permutación y otra donde el porcentaje mayor corresponde al operador de combinación.

- **Prueba 1.**

Para la Prueba 1, se muestran las restricciones para aplicar el AG en la Tabla 4-3. Para esta prueba el operador con mayor porcentaje es el de **regeneración** y la permutación y combinación mantienen un porcentaje similar, la combinación superior se toma de un porcentaje de los mejores individuos, y la inferior de un porcentaje de los individuos catalogados como buenos. Con la combinación inferior se mantiene la diversidad en las siguientes generaciones.

Tabla 4-29 Prueba 1- Caso2.

Restricciones de la Prueba	
% máximo de deterioro	70%
Extensión del daño	libres
Individuos por generación	100
Generaciones	200
% de Clonación	6%
% de Combinación superior	25%
% de Combinación inferior	5%
% de Permutación	30%
% de Regeneración	34%

El mejor individuo de la generación 200 presenta cuatro daños (Tabla 4-4). Se puede observar que la convergencia es aceptable, ya que el AG localiza el daños A del caso 2, los cuales están representados como C y E.

*Tabla 4-30 Daños del mejor individuo de la prueba 1*

Daños	Ubicación (elementos finitos)	Cambio de E.
B	1340-1347	63.99%
C	1151-1165	4.85%
D	1340-1344	62.99%
<b>E</b>	<b>1365-1370</b>	<b>60.75%</b>

Como se puede observar y comparando los daños del caso 2 (Tabla 4-2) con los daños del mejor individuo (Tabla 4-4) se detectó el daño del caso 2 (daño A):

- El daño E corresponden a la ubicación del daño A, presenta una variación de más de 45 % de cambio en el módulo de Elasticidad (E). La ubicación del daño fue aceptable, solo se tuvo elementos menos que el buscado.
- Los daños B, C y D fueron generados por el AG los cuales tienen una ubicación muy cercana a la ubicación de los sensores, lo cual puede ser detectado y observado con relativa facilidad.

En la Figura 4.5 se muestra el grafico que plasma los errores obtenidos mediante la función de mínimos cuadrados de los mejores individuos para cada generación. Como se observa la búsqueda de buenas soluciones empieza en un punto alto, es decir, la convergencia es poca o nula. Después, conforme comienzan a entrar en acción los operadores genéticos, la diferencia entre las respuestas dinámicas va disminuyendo, lo que significa que mejores soluciones se han encontrado.

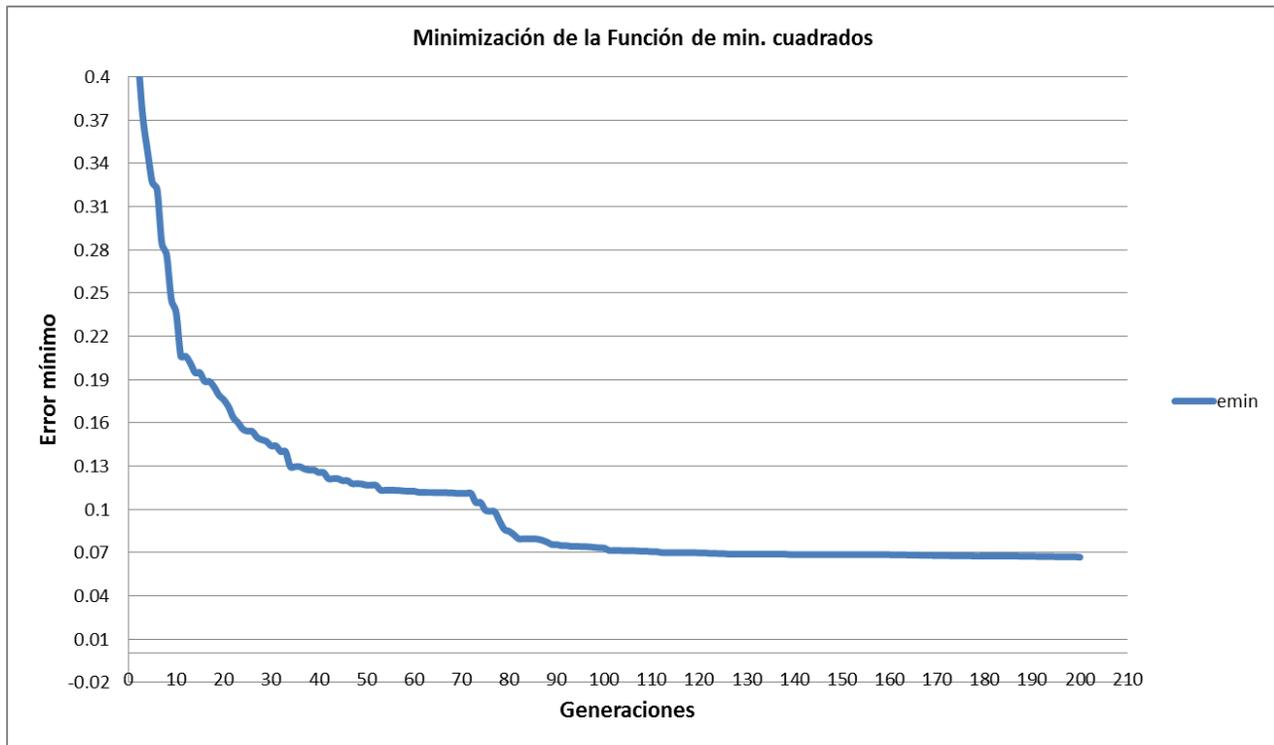


Figura 4.30 Grafico de la Minimización entre las respuestas dinámicas en la prueba 1 del caso2.

#### 4.4 CONCLUSIONES.

Es de gran importancia optimizar el número de generaciones y de individuos por población para que el AG tenga un buen resultado, un número grande de estos dos factores no garantizan obtener una mejor solución, simplemente crecería el tiempo de cómputo.

El AG tiene buen comportamiento para porcentajes altos de permutación al igual que de combinación, sin embargo se obtuvo una ligera mejoría cuando la permutación presenta un porcentaje mayor de actividad reproductiva.

El AG tiene una convergencia aceptable para el caso de detección de daño elementos estructurales tipo barra y tipo marco, en todas las pruebas ubico perfectamente las zonas con daños, y la cuantificación de los mismos fue muy cercana a los mismos. Por lo tanto se detectó, ubico y cuantifico el daño para este tipo de elementos.

Se probó el AG con un modelo de un puente real, el cual fue una tarea complicada para la detección de daños, se llevó más de seis días de tiempo continuo de cómputo por prueba, pero se tuvo un resultado aceptable ya que para un modelo de más de 1500 elementos finitos se disminuyó las zonas probables de daño a menos de ocho zonas con posibilidades de daño, lo cual es de gran ayuda, ya que, en casos reales nos permitirá enfocar las inspecciones en zonas específicas y no en toda la estructura.

Se concluye que el AG tiene un funcionamiento aceptable para la detección de daños en estructuras. En cuanto a trabajos futuros se pueden efectuar estudios y pruebas con AG que puedan analizar daños combinados de distintos parámetros estructurales a la vez, para así tener una mayor exactitud. También se requiere una optimización en el AG para que al momento en el que la minimización de la función error sea muy poca o nula, se detenga el AG y con esto se ahorre tiempo de cómputo.

## REFERENCIAS

- Abdel Wahab, M. M. & De Roeck, G., 1999. Damage Detection in bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario. *Journal of Sound and Vibration*, pp. 217-235.
- Achenbach, J. D., 2008. Structural health monitoring – What is the prescription?. *Mechanics Research Communications*, pp. 137-142.
- Aktan, A. E. & Grimmelsman, K. A., 1999. Structural identification: Analytical Aspects. *Journal of Structural Engineering*, pp. 817-829.
- Aktan, A. E., Helmicki, A. J. & Hunt, V. J., 1998. Issues in Health Monitoring for Intelligent Infrastructure. pp. 674-692.
- Allampalli, S., Fu, G. & Dillon, E. W., 1995. *On the Use of Measured Vibration for Detecting Bridge Damage*. San Francisco California, s.n., pp. 125-137.
- Allemang, R. J. & Brown, D. L., 1982. *A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis*. Orlando Florida, s.n.
- ASM International, 1998. *Nondestructive Evaluation and quality control*. 9th ed. s.l.:ASM Metals Handbook .
- Bathe, K.-J. & Wilson, E., 1976. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
- Bert, C. W., 1993. Relationship Between Fundamental Natural Frequency and Maxim Static Deflection for Various Linear Vibratory Systems. *Journal of Sound and Vibration*, pp. 547-557.
- Borges, C. C., Barbosa, H. J. C. & Lemonge, A. C. C., 2006. A structural damage identification method based on genetic algorithm and vibrational data. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, p. 2663–2686.
- Carden, E. P. & Fanning, P., 2004. Vibration based condition monitoring: a review. *Structural Health Monitoring*, pp. 355-375.
- Carrión, F. J., 2002. *Tesis de Doctorado: Aplicación de las Funciones Intermedias en Tiempo Frecuencia al Análisis de Sistemas Sujetos a Vibración*. Universidad Autónoma de Querétaro: Facultad de Ingeniería División de Postgrado.
- Carrión, F. J., Doyle, J. F. & Lozano, A., 2003. Structural health Monitoring and Damage Detection using a sub-domain inverse Method. *Smart Materials and Structures*, pp. 776-784.
- Carrión, F. J., Lomelí, M. G., Quintana, J. A. & Martínez, M., 2003. *La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes*. Safandila, Querétro: IMT Publicación Técnica No. 231.
- Carrión, F. J., López, J. A., Quintana, J. A. & Lozano, A., 2007. Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge. *Experimental Mechanics*.
- Casciati, S., 2008. Stiffness identification and damage localization via differential evolution algorithms. *Structural Control and Health Monitoring*, pp. 436-449.

- Coello, C. A., 1995. Introducción a los Algoritmos Genéticos y sus Aplicaciones. *Soluciones Avanzadas. Tecnologías de Información y Estrategias de Negocios*, pp. 5-11.
- Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B. & Shevitz, D. W., 1996. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. *Technical Report LA-1307-MS*.
- Doyle, J. F., 1997. *Wave Propagation in Structures*. New York, U.S.A.: Springer-Verlag.
- Doyle, J. F., 2004. *Modern Experimental Stress Analysis*. New York, U.S.A.: Wiley and Sons.
- Ewins, D. J., 2000. *Modal Testing, Practice and Application*. Hertfordshire, England: 2nd edition, Research Studies Press LTD.
- Flores, F. R., 2008. *Analisis sobre dos nuevos metodos iterativos para resolver ecuaciones no lineales*. Mérida: Universidad Nacional Abierta.
- Fox, C., 1989. The location of defects in structures: A comparison of the use of natural frequency and mode shape data. *Proceedings of the 10th FHWA. U.S. Department of Transportation*.
- Fuhr, P. L., Huston, D. R., Kajenski, P. J. & Ambrose, T. P., 1992. Performance and Health Monitoring of the Stafford Medical Building Using Embedded Sensors. *Journal of Smart Materials and Structures*, pp. 63-68.
- Goldberg, D. E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. U.S.A.: Addison-Wesley.
- Hernández, M. R., 2010. Detección de daños a partir de cambios en las características vibracionales usando redes neuronales.. pp. 1-10.
- Holland, J. H., 1992. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence..* U.S.A.: MIT Press.
- Huston, D. R. et al., 1999. Ground Penetrating Radar for Concrete Bridge Health Monitoring Applications. *Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III*, pp. 170-179.
- Inman, D., 2001. Multifunctional Structures of the Next Millennium. *Structural Dynamics@2000: Current status and Future Directions*, pp. 59-70.
- Jhonis, S., 2011. *scribd.com*. [Online] Available at: <http://es.scribd.com/doc/53889709/ALGORITMOS-DE-BUSQUEDA>
- Kato, M. & Shimada, S., 1986. Vibration of PC Bridge During Failure Process. *Journal of Structural Engineering*, pp. 1692-1703.
- Ko, J. M. & Ni, Y. Q., 2005. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, pp. 1715-1725.
- Kouchmeshky, B., Aquino, W., Bongard, J. C. & Lipson, H., 2006. Co-evolutionary algorithm for structural damage identification using minimal physical testing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, pp. 1085-1107.
- Kouchmeshky, B., Aquino, W., Bongard, J. & Billek, A. E., 2007. Structural damage identification using co-evolution and frequency response functions. *Structural Control and Health Monitoring*, pp. 162-182.

- Lieven, N. A. & Ewins, D. J., 1988. *Spatial Correlation of Mode Shapes. The Coordinate MODE Assurance Criterion (COMAC)*. Orlando, Florida, s.n.
- Lima, C. A. F., 2005. *Combining Competent Crossover and Mutation Operators: a Probabilistic Model Building Approach*. s.l., s.n.
- Linag, Z. & Lee, G. C., 1994. Damping of Structures Part I. *NCEER Report, NCEER 91-004*.
- Mathews, J. H. & Fink, K. D., 2000. *Métodos Numéricos con MATLAB*. Madrid: Prentice Hall.
- Merchán, E. A., 2005. Soft-computing techniques in the trajectory planning of robot manipulators sharing a common workspace. *Automatic Control and Systems Engineering*, p. 204.
- Meruane, V. & Heylen, W., 2010. Structural damage assessment with antiresonances versus mode shapes using parallel genetic algorithms. *Structural Control and Health Monitoring*.
- Pandey, A. K., Biswas, M. & Samman, M. M., 1991. Damage Location from Changes in Curvature Mode Shape. *Journal of Sound and Vibration*, p. 145 (2).
- Pérez, M. A., 2011. *Ubicación de sensores para el monitoreo del puente Río Papaloapan mediante técnicas globales de detección de daño*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Celaya: Tesis de Maestría.
- Quintana, J. A., 2004. *A Global Search Method for Damage Detection in General Structures*. Astronautics and Aeronautics Department, Purdue University, U.S.A.: Tesis de Maestría.
- Quintana, J. A., 2009. *Análisis del Método de Búsqueda Global para la detección de daño y monitoreo estructural de puentes*. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México D.F.: Tesis de Doctorado.
- Rodríguez, P. T., 2011. Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones. pp. 1-9.
- Rytter, A., 1993. *Vibration Based inspection of civil engineering structures*. Denmark: Alborg University .
- Saitoh, M. & Takei, B. T., 1996. *Damage Estimation and Identification of Structural Faults Using Modal Parameters*. Dearborn, MI, U.S.A., s.n.
- Salawu, O. S. & Williams, C., 1992. *Damage Location Using Vibration Mode Shape*. Honolulu Hawaii, s.n.
- Salawu, H. J., 1997. Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: A Review. *Engineering Structures*, pp. 718-723.
- Schaffer, J. D., 1989. *A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimisation..* s.l., s.n., pp. 51-60.
- Spears, W. M. & De Jong, K. A., 1991. An Analysis of Multi-point Crossover. *Proceedings of the First Workshop Foundations of Genetic Algorithms*, pp. 301-315.
- Turner, J. D. & Pretolve, A. J., 1988. A Study of the Spectrum of Traffic-induced Bridge Vibration. *Journal of Sound and Vibration*, pp. 31-42.
- Valenzuela, V., 2006. *Manual de análisis y diseño de algoritmos*. s.l.:Ingeniería en Gestión Informática INACAP Copiapó.
- Waisman, H., Chatzi, E. & Smyth, A. W., 2009. Detection and quantification of flaws in

structures by the extended finite element method and genetic algorithms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, pp. 303-328.

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

## APENDICE

- **Algoritmo Genético en lenguaje FORTRAN para una estructura.**

```

c AG PARA DETECCION DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS
USE msflib
integer::nomat,Z,N,casos,elem,sensor,longvec
integer::renglon,temp01,temp02,temp03,loadnode
integer::pctclon,clon,sum01,pctcoma,pctsup,coma,sup,supb
integer::sum02,sum03,pctcomb,Ini,comab,pctsupb,exten
Integer::pctpera,pctperb,pctperc,comap,ind01,ind02,ind01r
Integer::ind02r,GE,GET,Gene,DM,sum07
real::zz,nn,value,public,falso,porcen,caso,pro01
real::porind01,porind02,promedio,sum06,pext
doubleprecision::base
real,dimension(20000,20)::BB,CC,EE,FF,newst,GG,HH
Integer,dimension(20000,20)::AA,DD,ID,NID,TID,GENEW
Integer, Dimension(100000)::Vector,cont,contex,etiq
real, dimension(100000)::VID,error,acum,etot,aux,auxb,NVID
real, dimension(100000)::TVID,VGENEW
Integer, dimension(1000)::Padre
LOGICAL(4) GAMMA
c ABRIR ARCHIVOS DE DATOS Y ARCHIVOS DE SALIDA
idata=20
open(unit=idata, file='header.dat')
rewind(idata)
idatb=21
open(unit=idatb, file='mat.dat')
rewind(idatb)
idatc=22
open(unit=idatc, file='nodegp.dat')
rewind(idatc)
idatd=23
open(unit=idatd, file='bcs.dat')
rewind(idatd)
idate=24
open(unit=idate, file='loads.dat')
rewind(idate)
idatf=25
open(unit=idatf, file='matprop.dat')
rewind(idatf)
idatg=26
open(unit=idatg, file='dano001.dyn')
rewind(idatg)
iout=30
open(unit=iout, file='generacion1.dat')
rewind(iout)
iouta=31
open(unit=iouta, file='materials.dat')
rewind(iouta)
ioutb=32
open(unit=ioutb, file='barra.sdf')
rewind(ioutb)
ioutc=33
open(unit=ioutc, file='error.dat')
rewind(ioutc)
ioutd=34
open(unit=ioutd, file='errord.dat')
rewind(ioutd)
ioute=35
open(unit=ioute, file='AGD.dat')
rewind(ioute)
c LEER LOS DATOS DE LOS ARCHIVOS
do i=1, 600
    read(idata,*)AA(i,1:5)
enddo
do i=1, 1
    read(idatb,*)BB(i,1:3)
enddo
do i=1, 601
    read(idatc,*)CC(i,1:4)
enddo
do i=1, 2
    read(idatd,*)DD(i,1:7)
enddo
do i=1, 1

```

## Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la Detección de Daños en Estructuras.

```

    read(idate,*)EE(i,1:8)
enddo
do i=1, 1
    read(idatf,*)FF(i,1:9)
enddo
C  Lectura del archivo con respuestas de dano fijo dano001.dyn
write(*,*)'escribe el numero de sensores'
read(*,*)sensor
write(*,*)'numero de datos=longitud del vector'
read(*,*)longvec
do i=1, longvec
    read(idatg,*)GG(i,1:sensor+2)
enddo
base= 0.01295
c  numero de ciclos = N
c  semilla = Z, numero de 6 digitos e impar.
write(*,*)'Cuantas generaciones se generaran'
Read(*,*)Gene
Write(*,*)'Escribe la semilla'
Read(*,*)Z
Write(*,*)'Escribe el numero de casos'
Read(*,*)N
Write(*,*)'Escribe el numero de elementos'
Read(*,*)elem
Write(*,*)'Escribe el maximo porcentaje de deterioro'
read(*,*)porcen
write(*,*)'Escribe el nodo de impacto'
read(*,*)loadnode
write(*,*)'Escribe el porcentaje de clonacion'
read(*,*)pctclon
write(*,*)'Escribe el porcentaje de combinacion A'
read(*,*)pctcoma
write(*,*)'Escribe el porcentaje superior para combinacion A'
read(*,*)pctsup
write(*,*)'Escribe el porcentaje de combinacion B'
read(*,*)pctcomb
write(*,*)'Escribe el porcentaje de casos para combinacion B'
read(*,*)pctsupb
write(*,*)'Escribe el porcentaje de permutacion x ST'
read(*,*)pctpera
write(*,*)'Escribe el porcentaje de permutacion x Ubicacion'
read(*,*)pctperb
write(*,*)'Escribe el porcentaje de permutacion x Extension'
read(*,*)pctperc
falso=elem
Pubic=1.0/elem
c  contador en cero para asegurarnos que comience en ceros.
do i=1, 5
    cont(i)=0
enddo
enddo
do i=1, 10
    contex(i)=0
enddo
casos=0
c  ciclos do para generar 100 casos de daño aleatorios
c  (numero de daños 1 hasta 5 daños maximo)
do i=1, N
    Val=ran(z)*10000
    If(val .le. 5160)then
        Vector(i)=1
        cont(1)=cont(1)+1
    endif
    If(val .gt. 5160)then
        if (val .le. 7740)then
            vector(i)=2
            cont(2)=cont(2)+1
        endif
        endif
        If(val .gt. 7740)then
            if (val .le. 9030)then
                vector(i)=3
                cont(3)=cont(3)+1
            endif
            endif
            If(val .gt. 9030)then
                if (val .le. 9670)then
                    vector(i)=4
                    cont(4)=cont(4)+1
                endif
                endif
                If(val .gt. 9670)then
                    vector(i)=5
                    cont(5)=cont(5)+1
                endif
                write(iout,*)vector(i),i,i
            c  ciclo para generar la extencion de daño
            c  (de 1 hasta 10 elementos con daño)
            do j=1, vector(i)
                casos=casos+1
            c  COMIENZA UBICACION
                valb=ran(z)
                do k=1, elem
                    if(valb .ge. pubic*k-pubic)then
                        if(valb .lt. pubic*k)then
                            GENEW(j,2)=k
                        endif
                    endif
                enddo
            enddo

```

## Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la Detección de Daños en Estructuras.

```

Vala=ran(z)*10000
c  COMIENZA Extensión
  Exten=elem-GENEW(j,2)
  If(Exten .eq. 0)then
    Exten=1
  endif
  Pext=1.0/Exten
  valb=ran(z)
  do k=1, elem
    if(valb .ge. pext*k-pext)then
      if(valb .lt. pext*k)then
        GENEW(j,1)=k
      endif
    endif
  enddo
  valc=ran(z)
  VGENEW(j)=(valc*porcen)
C 190  DETERIORO
  enddo
  Do j=1, vector(i)
  do k=1, vector(i)
    If(GENEW(j,2) .lt. GENEW(K,2))then
      GENEW(vector(i)+1,1:2)=GENEW(j,1:2)
      VGENEW(vector(i)+1)=VGENEW(j)
      GENEW(j,1:2)=GENEW(k,1:2)
      VGENEW(j)=VGENEW(k)
      GENEW(k,1:2)=GENEW(vector(i)+1,1:2)
      VGENEW(k)=VGENEW(vector(i)+1)
    endif
  enddo
  enddo
  do j=1, vector(i)
    write(iout,*)GENEW(j,1:2),VGENEW(j)
  enddo
c 197  TERMINA EL CICLO DE N
  enddo
  rewind(iout)
c  LEER ARCHIVO GENARACION1.DAT
  renglon=0
  do i=1,N
    Renglon=Renglon+vector(i)
  enddo
  Renglon=Renglon+N
  do i=1,Renglon
    Read(iout,*)ID(i,1:2),VID(i)
    write(*,*)ID(i,1:2),VID(i)
  enddo
  do i=1, N
    write(*,*)vector(i)
  enddo
  do i=1, 5
    zz=cont(i)
    nn=N
    value=(zz/nn)*100
    write(*,*)'la probabilidad de',i, 'daños es',value
  enddo
  do i=1, 10
    zz=context(i)
    nn=casos
    value=(zz/nn)*100
    write(*,*)'la probabilidad de',i, 'extensiones es',value
  enddo
  write(*,*)'la probabilidad de ubicar',elem,'elementos es',pubic
c  FIN DEL PROGRAMA random.for
c  ESCRIBIR ARCHIVO DE SALIDA MODIFICADO
C  Ciclo principal de nuevas generaciones
  do DM=1, Gene
    Write(*,*)'Generacion',DM
    Write(*,*)'Generacion',DM
    suma=0
    do i=1, N
      error(i)=0
    enddo
    do i=1, N
      rewind(ioutb)
      suma=suma+vector(i)+1
      write(ioutb,*)1
      write(ioutb,*)33
      write(ioutb,*)0,0,0,0
      write(ioutb,*)'end'
    enddo
  enddo
c  ESCRIBIR ::ELEMENT GROUP (HEADER.DAT)
  write(ioutb,*)elem
  do j=1, elem
    write(ioutb,84)AA(j,1:5)
  enddo
  write(ioutb,*)'end'
c  ESCRIBIR ::MATL DISTN (MAT.DAT)
  nomat=vector(i)+1
  write(ioutb,*)nomat
  write(ioutb,*)1,elem,1
  do j=1, vector(i)
    temp01=ID(suma-vector(i)+j,2)
    temp02=ID(suma-vector(i)+j,1)
    temp03=temp01+temp02-1
    write(ioutb,84)temp01,temp03,j+1
  enddo
  write(ioutb,*)'end'
c  ESCRIBIR ::NODE GROUP (NODEGP.DAT)

```

```

write(ioutb,*)elem+1
do j=1, elem+1
  write(ioutb,84)j, CC(j,2:4)
enddo
write(ioutb,*)'end'
c  ESCRIBIR ::BOUNDARY CONDENS (BCS.DAT)
write(ioutb,*)2
do j=1, 2
  write(ioutb,84)DD(j,1:7)
enddo
write(ioutb,*)'end'
c  ESCRIBIR ::LOADS (LOADS.DAT)
write(ioutb,*)1
write(ioutb,84)loadnode,EE(1,2:8)
write(ioutb,*)'end'
c  OK 279  ESCRIBIR ::MATL PROPS(MATPROP.DAT)
write(ioutb,*)nomat
do j=1, nomat
  newst(j,1)=(base*base)-
&  ((base*base*VID(suma-nomat+j))/100)
  if(j .eq. 1)then
    newst(j,1)=(base*base)
  endif
  newst(j,2)=abs(sqrt(newst(j,1)))
  newst(j,4)=(newst(j,2)**4)/12.0
  newst(j,5)=newst(j,4)
  newst(j,3)=newst(j,4)*2
  write(ioutb,84)j,70E+09,26E+09,newst(j,1),2710
&  ,0,newst(j,3:5)
  write(iouta,84)j,newst(j,1),newst(j,3:5)
enddo
write(ioutb,*)'end'
c  ESCRIBIR ::SPECIALS GROUP
write(ioutb,*)4
write(ioutb,84)2110,0,,03,0
write(ioutb,84)2120,0,0,0
write(ioutb,84)2210,,3,,3,0
write(ioutb,84)2212,0,1,0
write(ioutb,*)'end'
C  ESCRIBIR::BC GROUPS
write(ioutb,*)0
write(ioutb,*)'end'
close(unit=ioutb)
ioutb=32
open(unit=ioutb, file='barra.sdf')
rewind(ioutb)
C  SE CORRE StaDyn
gamma = SYSTEMQQ('c:\bin\stady<inex.2')
c  SE OBTIENE EL ERROR
write(ioutb,*)'end'

idath=26
open(unit=idath, file='stady.dyn')
rewind(idath)
do j=1, longvec
  read(idath,*)HH(j,1:sensor+2)
enddo
do j=1, sensor
  acum(j)=0
enddo
do j=1, sensor
  do k=1, longvec
    acum(j)=acum(j)+(GG(k,j+2)-HH(k,j+2))**2
  enddo
  error(i)=error(i)+sqrt(acum(j)/longvec)
enddo
write(*,*)error(i),i,DM
enddo
rewind(ioutc)
do i=1, N
  write(ioutc,*)i,error(i)
enddo
c  ORDENAR DE MENOR A MAYOR LOS ERRORES
rewind(ioutc)
do i=1,N
  Read(ioutc,*)etiq(i),etot(i)
  write(*,*)etiq(i),etot(i)
enddo
do i=1,N
  do j=1,N-1
    if(etot(j) .gt. etot(j+1))then
      aux(j)=etot(j)
      etot(j)=etot(j+1)
      etot(j+1)=aux(j)
      auxb(j)=etiq(j)
      etiq(j)=etiq(j+1)
      etiq(j+1)=auxb(j)
    endif
  enddo
enddo
sum06=0
rewind(ioutd)
do i=1,N
  write(ioutd,*)etiq(i),etot(i)
  sum06=sum06+etot(i)
enddo
promedio=sum06/N
write(ioute,84)etot(1),etot(N),promedio,DM
c  GENERACION DE NUEVOS CASOS
c  COMIENZA LOS QUE SE PRESERVAN (CLONES)

```

## Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la Detección de Daños en Estructuras.

```

clon=(N*pctclon)/100
write(*,*)clon
write(*,*)sum01
write(*,*)renglon
sum01=0
do i=1, clon
  do j=1, renglon
    if(etiq(i) .eq. ID(j,2))then
      if(etiq(i) .eq. vID(j))then
        sum01=sum01+1
        NID(sum01,1)=ID(j,1)
        NID(sum01,2)=i
        NVID(sum01)=i
        do k=1, ID(j,1)
          sum01=sum01+1
          NID(sum01,1:2)=ID(j+k,1:2)
          NVID(sum01)=VID(j+k)
        enddo
      endif
    endif
  enddo
enddo
Do i=1, sum01
  write(*,*)NID(i,1:2),NVID(i)
enddo
c  COMIENZA COMBINACION DE UN PORCENTAJE INICIAL
coma=(N*pctcoma)/100
sup=(N*pctsup)/100
c  SELECCION DE PADRES
do i=1, coma
  do j=1, 2
    caso=ran(z)
    pro01=1.0/sup
    write(*,*)caso,pro01
    do k=1, sup
      if(caso .ge. pro01*k-pro01)then
        if(caso .lt. pro01*k)then
          padre(j)=etiq(k)
        endif
      endif
    enddo
  enddo
  write(*,*)padre(1:2)
c  IDENTIFICACION DE PADRES
sum02=0
do j=1, renglon
  do m=1,2
    if(padre(m) .eq. ID(j,2))then
      if(padre(m) .eq. vID(j))then
        do k=1, ID(j,1)
          sum02=sum02+1
          TID(sum02,1:2)=ID(j+k,1:2)
          TVID(sum02)=VID(j+k)
        enddo
      endif
    endif
  enddo
enddo
c  COMBINACION DE PADRES
sum03=0
sum01=sum01+1
do j=1, sum02
  caso=ran(z)
  if(caso .gt. 0.5)then
    sum03=sum03+1
    sum01=sum01+1
    NID(sum01,1:2)=TID(j,1:2)
    NVID(sum01)=TVID(j)
  endif
enddo
NID(sum01-sum03,1)=sum03
NID(sum01-sum03,2)=clon+i
NVID(sum01-sum03)=clon+i
enddo
c  FINALIZA Combinacion SUPERIOR
write(*,*)sum01
do i=1, sum01
  write(*,*)NID(i,1:2),NVID(i)
enddo
c  Comienza permutación fina
do i=1, clon
  caso=ran(z)
  pro01=1.0/clon
  write(*,*)caso,pro01
  do k=1, clon
    if(caso .ge. pro01*k-pro01)then
      if(caso .lt. pro01*k)then
        padre(1)=etiq(k)
      endif
    endif
  enddo
  Ind01=0
  do j=1, renglon
    if(padre(1) .eq. ID(j,2))then
      if(padre(1) .eq. vID(j))then
        do k=1, ID(j,1)
          Ind01=Ind01+1
          TID(ind01,1:2)=ID(j+k,1:2)
        enddo
      endif
    endif
  enddo
enddo

```

## Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la Detección de Daños en Estructuras.

```

        TVID(ind01)=VID(j+k)
    enddo
endif
endif
enddo
if (ind01 .gt. 0)then
    porind01=1.0/ind01
endif
caso=ran(z)
do k=1, ind01
    if(caso .ge. porind01*k-porind01)then
        if(caso .lt. porind01*k)then
            ind01r=k
        endif
    endif
endif
enddo
C Permutación fina por ubicación
If(i .le. clon/3)then
    caso=ran(z)
    if(caso .ge. 0.5)then
        sum01=sum01+1
        NID(sum01,1)=ind01
        NID(sum01,2)=i+coma+clon
        NVID(sum01)=i+coma+clon
        do K=1, ind01
            sum01=sum01+1
            NID(sum01,1:2)=TID(k,1:2)
            NVID(sum01)=TVID(k)
            if(ind01r .eq. k)then
                NID(sum01,2)=NID(sum01,2)+1
            endif
        enddo
    endif
    if(caso .lt. 0.5)then
        sum01=sum01+1
        NID(sum01,1)=ind01
        NID(sum01,2)=i+coma+clon
        NVID(sum01)=i+coma+clon
        do K=1, ind01
            sum01=sum01+1
            NID(sum01,1:2)=TID(k,1:2)
            NVID(sum01)=TVID(k)
            if(ind01r .eq. k)then
                NID(sum01,1)=NID(sum01,1)-1
            endif
            if(NID(sum01,1) .le. 0)then
                NID(sum01,1)=NID(sum01,1)+1
            endif
        enddo
    endif
endif
endif
enddo
C Permutación fina por seccion transversal
If(i .gt. 2*clon/3)then
    If(i .le. clon)then
        caso=ran(z)
        if(caso .ge. 0.5)then
            sum01=sum01+1
            NID(sum01,1)=ind01
            NID(sum01,2)=i+coma+clon
            NVID(sum01)=i+coma+clon
            do K=1, ind01
                sum01=sum01+1
                NID(sum01,1:2)=TID(k,1:2)
                NVID(sum01)=TVID(k)
                if(ind01r .eq. k)then
                    NID(sum01,2)=NID(sum01,2)+1
                endif
            enddo
        endif
    endif
endif
endif
enddo

```





## Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la Detección de Daños en Estructuras.

```

do k=1, ind01+ind02
  write(*,*)TID(k,1:2),TVID(k),i
enddo
If(i .le. N*pctpera/200)then
  ST1=TVID(ind01r)
  TVID(ind01r)=TVID(ind02r)
  TVID(ind02r)=ST1
  sum01=sum01+1
  NID(sum01,1)=Ind01
  NID(sum01,2)=(i-1)*2+2*clon+coma+comab+1
  NVID(sum01)=(i-1)*2+2*clon+coma+comab+1
do k=1, ind01
  Sum01=sum01+1
  NID(sum01,1:2)=TID(k,1:2)
  NVID(sum01)=TVID(k)
enddo
sum01=sum01+1
NID(sum01,1)=Ind02
NID(sum01,2)=i*2+2*clon+coma+comab
NVID(sum01)=i*2+2*clon+coma+comab
do k=1, ind02
  Sum01=sum01+1
  NID(sum01,1:2)=TID(k+ind01,1:2)
  NVID(sum01)=TVID(k+ind01)
enddo
endif
C  comienza permutacion por Ubicacion
If(i .gt. N*pctpera/200)then
If(i .le. (pctpera+pctperb)*N/200)then
  ubic=TID(ind01r,2)
  TID(ind01r,2)=TID(ind02r,2)
  TID(ind02r,2)=ubic
  sum01=sum01+1
  NID(sum01,1)=Ind01
  NID(sum01,2)=(i-1)*2+2*clon+coma+comab+1
  NVID(sum01)=(i-1)*2+2*clon+coma+comab+1
do k=1, ind01
  Sum01=sum01+1
  NID(sum01,1:2)=TID(k,1:2)
  NVID(sum01)=TVID(k)
enddo
sum01=sum01+1
NID(sum01,1)=Ind02
NID(sum01,2)=i*2+2*clon+coma+comab
NVID(sum01)=i*2+2*clon+coma+comab
do k=1, ind02
  Sum01=sum01+1
  NID(sum01,1:2)=TID(k+ind01,1:2)
  NVID(sum01)=TVID(k+ind01)
enddo
endif
C  comienza permutacion por tamaño del dano
If(i .gt. (pctpera+pctperb)*N/200)then
If(i .le. (pctpera+pctperb+pctperc)*N/200)then
  size=TID(ind01r,1)
  TID(ind01r,1)=TID(ind02r,1)
  TID(ind02r,1)=size
  sum01=sum01+1
  NID(sum01,1)=Ind01
  NID(sum01,2)=(i-1)*2+2*clon+coma+comab+1
  NVID(sum01)=(i-1)*2+2*clon+coma+comab+1
do k=1, ind01
  Sum01=sum01+1
  NID(sum01,1:2)=TID(k,1:2)
  NVID(sum01)=TVID(k)
enddo
sum01=sum01+1
NID(sum01,1)=Ind02
NID(sum01,2)=i*2+2*clon+coma+comab
NVID(sum01)=i*2+2*clon+coma+comab
do k=1, ind02
  Sum01=sum01+1
  NID(sum01,1:2)=TID(k+ind01,1:2)
  NVID(sum01)=TVID(k+ind01)
enddo
endif
C  Finaliza permutacion
C  Generacion de nuevos casos
Do i=1, sum01
  write(*,*)NID(i,1:2),NVID(i)
enddo
do i=1, 5
  cont(i)=0
enddo
do i=1, 10
  contex(i)=0
enddo
casos=0
GET=(pctclon*2+pctcoma+pctcomb+pctpera+pctperb+pctperc)

```

```

GE=(N*GET)/100)+1
do i=GE, N
  Val=ran(z)*10000
  If(val .le. 5160)then
    Vector(i)=1
    cont(1)=cont(1)+1
  endif
  If(val .gt. 5160)then
    if (val .le. 7740)then
      vector(i)=2
      cont(2)=cont(2)+1
    endif
  endif
  If(val .gt. 7740)then
    if (val .le. 9030)then
      vector(i)=3
      cont(3)=cont(3)+1
    endif
  endif
  If(val .gt. 9030)then
    if (val .le. 9670)then
      vector(i)=4
      cont(4)=cont(4)+1
    endif
  endif
  If(val .gt. 9670)then
    vector(i)=5
    cont(5)=cont(5)+1
  endif
  sum01=sum01+1
  NID(sum01,1)=vector(i)
  NID(sum01,2)=i
  NVID(sum01)=i
c ciclo para generar la extencion de daño
c (de 1 hasta 10 elementos con daño)
do j=1, vector(i)
  casos=casos+1
c COMIENZA UBICACION
  valb=ran(z)
  do k=1, elem
    if(valb .ge. pubic*k-pubic)then
      if(valb .lt. pubic*k)then
        GENEW(j,2)=k
      endif
    endif
  enddo
  Vala=ran(z)*10000
c COMIENZA Extensión
  Exten=elem-GENEW(j,2)
  If(Exten .eq. 0)then
    Exten=1
  endif
  Pext=1.0/Exten
  valb=ran(z)
  do k=1, elem
    if(valb .ge. pext*k-pext)then
      if(valb .lt. pext*k)then
        GENEW(j,1)=k
      endif
    endif
  enddo
  valc=ran(z)
  VGENEW(j)=(valc*porcen)
C 190 DETERIORO
  enddo
  Do j=1, vector(i)
    do k=1, vector(i)
      If(GENEW(j,2) .lt. GENEW(K,2))then
        GENEW(vector(i)+1,1:2)=GENEW(j,1:2)
        VGENEW(vector(i)+1)=VGENEW(j)
        GENEW(j,1:2)=GENEW(k,1:2)
        VGENEW(j)=VGENEW(k)
        GENEW(k,1:2)=GENEW(vector(i)+1,1:2)
        VGENEW(k)=VGENEW(vector(i)+1)
      endif
    enddo
  enddo
C 190 DETERIORO
  do j=1, vector(i)
    sum01=sum01+1
    NID(sum01,1)=GENEW(j,1)
    NID(sum01,2)=GENEW(j,2)
    NVID(sum01)=VGENEW(j)
  enddo
c 197 TERMINA EL CICLO DE generacion de nuevos casos
C comienza cambio de identificadores
do i=1, sum01
  write(*,*)NID(i,1:2),NVID(i)
  write(*,*)ID(i,1:2),VID(i)
enddo
rewind(iout)
sum07=0
do i=1, sum01
  ID(i,1:2)=NID(i,1:2)
  VID(i)=NVID(i)
  write(iout,*)ID(i,1:2),VID(i)
  If(ID(i,2) .eq. VID(i))then
    write(*,*)vector(sum07)

```

```
sum07=sum07+1
vector(sum07)=ID(i,1)
write(*,*)vector(sum07)
endif
enddo
write(*,*)sum01
do i=1, sum01
write(*,*)NID(i,1:2),NVID(i)
write(*,*)ID(i,1:2),VID(i)
enddo
enddo
C termina ciclo principal
enddo
84 format(1x,42(g12.6,1x))
Write(*,*)3Archivos listos en'
Write(*,*)materials.dat y barra.sdf
Write(*,*)'error.dat,errorr.dat y generacion1.dat'
end
```

- Artículo presentado en el 8vo. Congreso Internacional de Ingeniería.



### Diseño de algoritmos genéticos (AG) para la detección de daños en Estructuras. Design of genetic algorithms (GA) for detection of damage in structures.

Daniel Arceo Mariñelarena<sup>1</sup>, Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández<sup>1</sup>, Juan Antonio Quintana Rodríguez<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Cerro de las Campanas s/n, Colonia Las Campanas, C.P. 76010, Santiago de Querétaro, Querétaro.

<sup>2</sup>Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural, Km 12, Carretera Querétaro – Galindo, C.P. 76700 Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro. Tel: (442) 2 16 97 77

RESUMEN. Se presenta el desarrollo y aplicación de los Algoritmos Genéticos (AG) como método de búsqueda para desarrollar una técnica de evaluación no destructiva en estructuras. En este caso se tomara como fundamento el Método de Búsqueda Global (MBG) y se buscara su optimización, mediante el uso de AG.

Los AG han servido como optimizadores en el diseño de estructuras y componentes estructurales, por lo que es posible utilizar esta metodología dentro del análisis de propagación de ondas para la detección de daño y después a partir de AG combinar, cambiar, permutar estos daños hasta encontrar la combinación apropiada que represente una condición estructural con daño.

La evaluación de las respuestas dinámicas de la estructura con daño, pueden ser comparadas con las respuestas dinámicas de la estructura representado con un modelo calibrado de elemento finito y evaluadas a través de la minimización de funciones de error, para el desarrollo de esta investigación se pretende llegar a la solución real del sistema a través de la simulación de escenarios de daño los cuales se adaptan a la condición de la estructura dañada a través de AG, lo que abre la posibilidad de encontrar múltiples daños en una estructura y encontrar una solución exacta.

**Palabras clave:** Algoritmos Genéticos, respuesta dinámica, pruebas no destructivas, optimización, monitoreo estructural.

#### 1. INTRODUCCIÓN:

A nivel mundial el monitoreo se ha estado empleado para la detección y evaluación de daño en estructuras. En general, el monitoreo de la condición de una estructura se define como “la medida de las condiciones de operación y de carga, y de las respuestas críticas de una estructura para dar seguimiento y evaluar síntomas anormales de operación y o deterioro o daño que afecten el servicio, seguridad o confiabilidad de la misma” [Aktan y Grimmelsman, 1999].

El monitoreo y evaluación estructural hoy en día es posible y necesaria en la conservación de la infraestructura de un país. La problemática en países desarrollados estriba en la cantidad de puentes que conforman la red de carreteras, los cuales necesitan ser evaluados periódicamente debido a dos factores fundamentales: el tiempo de servicio de los puentes, y el incremento en el flujo vehicular. En México esta problemática no es la excepción, salvo con una ligera ventaja, de que varios de los puentes con más de 30 años de servicio fueron diseñados con

## Diseño de Algoritmos Genéticos (AG) para la Detección de Daños en Estructuras.

factores de seguridad elevados [Carrión, 2002]. No obstante esta ventaja, es necesario determinar la vida útil de las estructuras, conocer su índice de desempeño, realizar programas de mantenimiento preventivo y elaborar planes de restricción de tráfico en caso de daño repentino ocasionado por accidentes o condiciones climáticas extremas.

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

Existe una amplia investigación en los últimos 30 años para la detección de daño en estructuras civiles, aeronáuticas, mecánicas, en la tabla 1.1 se presentan algunos de los métodos para la detección de daño:

La idea básica de estos métodos es observar el comportamiento de los parámetros modales (frecuencias, modos de vibrar, amortiguamiento modal) los cuales se correlacionan con cambios en los parámetros estructurales en las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento.

**Tabla 1. Diversos métodos utilizados para detección de daño en estructuras.**

MÉTODO	AUTORES
Métodos globales por vibraciones mecánicas y propagación de ondas.	Carrión, 2002
Cambio en las frecuencias naturales y modos de vibrar	Kato y Shimada, 1986
Cambios en las propiedades modales	Kato y Shimada, 1986; Turner y Pretolve, 1988; Allampalli , Fu y Dillon, 1995
Índices de daño a través de los modos de vibrar y sus derivados como el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC)	Allemang y Brown, 1982
El Factor de escala modal (MSF)	Ewins, 2000
Criterio desplazamiento-frecuencia	Bert, 1993
Criterios basados en la energía de deformación	Linag y Lee, 1994
Criterio de Aseguramiento Modal Coordinado	Abdel y De Roeck, 1999; Salawu, 1997; Saitoh y Takei, 1996
Cambios de la curvatura modal (MSC)	Pandey, Biswas y Samman, 1991
Cambios en las matriz de rigidez a partir de las formas modales	Zimmerman y Kauk, 1994
Método por subdominio inverso	Carrión, Doyle y Lozano, 2003
Detección de daño por propagación de ondas	Quintana, 2004

En todos los métodos de detección de daño una parte fundamental es la calibración del modelo matemático que represente las propiedades dinámicas y estáticas de las estructuras en estudio así como su respuesta ante excitaciones externas (respuesta dinámica y estática). Una inadecuada representación de los fenómenos físicos conllevará al fracaso de cualquiera de los métodos empleados.

Aunado a la investigación desarrollada hoy en día el costo, tamaño y peso de los sensores ha disminuido gracias a los avances en tecnología, lo que hace posible pensar en estructuras instrumentadas con miles de diferentes tipo de sensores [Aktan, Helmicki y Hunt, 1998]: Acelerómetros, Inclinómetros, Sismógrafos, Medidores de deformación, Estaciones meteorológicas, Cámaras de video, Velocímetros. Inclusive actuadores que permitan disminuir la vibración o evitar frecuencias que induzcan resonancia a la estructura o componente estructural. [Fuhr, Huston, Kajenski y Ambrose, 1992; Inman, 2001; Carrion, López, Quintana y Lozano, 2007]

Los avances en informática y tecnologías de comunicación hacen posible la formación de Sistemas Integrales de Administración de Puentes [Aktan y Grimmelsman, 1999], en donde todos los datos no solo del monitoreo estructural del puente si no también datos sobre el tráfico, modelos paramétricos pueden ser almacenados, procesados y analizados para la toma de decisiones y administración de recursos financieros de una red federal de carreteras.

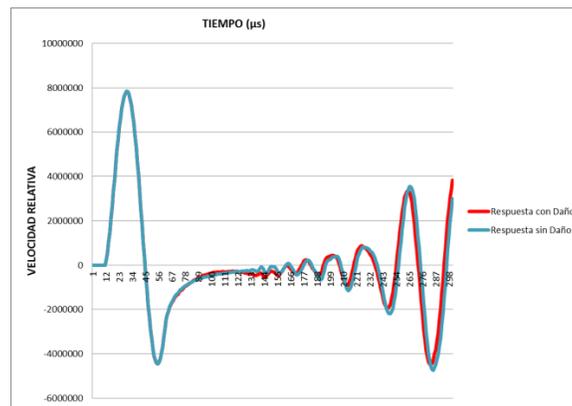
Dentro de las técnicas de evaluación de daño, el análisis de la propagación de ondas en la estructura, es un método que permite conocer el daño a partir de los cambios en la propagación de las ondas transmitidas y reflejadas sobre la estructura [Doyle, 1997, 2004]. El Método de Búsqueda Global se basa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

La evaluación de daño en estructuras mediante respuestas dinámicas ha recibido gran atención debido a sus aplicaciones prácticas [Doebbling, Farrar, Prime y Shevitz, 1996]. Al menos cuatro niveles de identificación de daño pueden ser obtenidos [Carden y Fanning, 2004]: i) Detección de existencia de daño. ii) Determinación de su ubicación. iii) Cuantificación de la severidad del daño. iv) Predicción de la vida útil de servicio de la estructura.

### 2. MÉTODO DE BÚSQUEDA GLOBAL (MBG).

El Método de Búsqueda Global se enfoca al problema de localización de daño mediante la identificación de cambios en los parámetros estructurales a partir de la propagación de ondas de alta frecuencia en la estructura. La base de este método radica en tres módulos básicos, la primera la existencia de un modelo estructural de Elemento Finito (EF) previamente calibrado que represente el comportamiento dinámico de la estructura en su condición de referencia o “sin daño”; la segunda, la parte experimental, cuyo objetivo es obtener la respuesta dinámica de la estructura ante una excitación de la misma en puntos específicos de interés, es decir, recolectar las ondas de propagación que pasan en un punto de la estructura; y la tercera, un algoritmo que almacena, compara, evalúa las respuestas dinámicas experimentales con las generadas por el modelo de elemento finito de la estructura. [Quintana, 2009]

Las ondas que se propagan ante la excitación de la estructura son transmitidas, reflejadas y atenuadas, por la interacción de los diferentes materiales en la estructura, por cambios en la geometría en el medio de propagación, por las condiciones de frontera, etc. [Doyle, 1997]. Estas propiedades de las ondas flexionantes se utilizan para la detección y ubicación de daño; si se parte de una estructura sin daño, las ondas registradas tendrán un patrón de propagación acorde a las propiedades mecánicas de los materiales y su geometría en la estructura, cuando existe un daño, una alteración en las propiedades o geometría de la estructura el patrón de propagación cambia, haciendo posible la detección de daño, asumiendo el daño como un cambio en los parámetros estructurales [Quintana, 2009]. Ver figura 1 respuesta con daño y sin daño de un elemento estructural.



**Figura 1.** Se puede observar como es la respuesta de una estructura idealizada sin daño y después cómo cambia cuando existe una variación en sus propiedades mecánicas (con daño).

Un parámetro, en el presente contexto, es cualquier variable estructural que describe al modelo de EF y que puede ser modificado sin cambiar la estructura básica del modelo mismo. Ejemplos de parámetros estructurales son: el módulo de elasticidad y rigidez, la densidad, la geometría y el amortiguamiento [Doyle, 2004; Quintana, 2004]. Por otro lado, existen otras variables a las cuales se refiere como indirectas, ya que no describen una característica directa del modelo, sino que son resultado de la respuesta del modelo ante una fuerza, carga o acción; tal es el caso del factor de intensidad de esfuerzos, la frecuencia natural de vibración o la velocidad de propagación de ondas. Todos las variables indirectas pueden cambiar por efecto de los cambios en los parámetros estructurales o mediante la modificación del programa fuente al cambiar el modelo matemático que describe el fenómeno físico en cuestión. Para el desarrollo y aplicación del MBG, para la calibración de un modelo, sólo se consideran los parámetros estructurales directos, especialmente los siguientes: módulo de elasticidad y rigidez, masa (densidad), tamaño del elemento finito y geometría (tamaño o área). En consecuencia, una vez calibrado el modelo, los cambios subsecuentes en los parámetros estructurales serán considerados como daño [Quintana, 2009].

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

Para calibrar un modelo de elemento finito de manera detallada es necesario que todos los parámetros estructurales tengan valores apropiados, similares o casi iguales a los del modelo físico, de tal forma que el comportamiento dinámico y estático del modelo EF sea igual o con poca variación respecto a la respuesta dinámica o estática experimental del modelo físico [Quintana, 2009]. En este caso, un modelo de un sistema lineal puede ser representado como:

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

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

Una nueva etapa del problema comienza cuando se sabe que la estructura tiene daño y el objetivo es cuantificarlo, lo que implica es

encontrar los valores de los parámetros que representan dicha condición y producen la respuesta dinámica registrada experimentalmente. Para ello, definimos una función de error de mínimos cuadrados entre la respuesta experimental y simulada, que se aplica de manera independiente para cada nodo instrumentado. Así, la variación asociada a un cambio en los parámetros estructurales se cuantifica usando esta función de mínimos cuadrados (Ecuación 2) que se obtiene de la diferencia entre la respuesta dinámica experimental en el nodo  $j$   $\{r_{exp}\}_j$  y la respuesta del modelo de EF en ese mismo nodo  $j$   $\{r_{mod}\}_j$ . En este caso, el vector de respuestas  $\{r\}_j$  puede estar definido por los desplazamientos  $\{u\}$ , las velocidades  $\{\dot{u}\}$  o las aceleraciones  $\{\ddot{u}\}$ , según el tipo de sensor que se utilice. Si no hay diferencia entre ambas respuestas, significa que los parámetros estructurales utilizados en el modelo corresponden con los de la estructura real. Así, cuando la variación de las respuestas dinámicas es significativa, se infiere que existe daño y que, mediante un proceso recursivo, es posible cambiar los parámetros estructurales del modelo para minimizar dicha variación de las respuestas dinámicas e inferir las cualidades del daño [Quintana, 2009].

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

El término  $r_i$  representa la respuesta dinámica en el nodo  $j$  al tiempo  $i$  y  $N$  es el número de datos en el que dicha respuesta es discretizada en el tiempo. El tiempo total y la frecuencia de muestreo determinarán el número de datos en la ecuación de variación de las respuestas dinámicas; por ejemplo, si los datos son adquiridos a una frecuencia de 100 kHz durante un periodo de tiempo de 2500  $\mu$ s, los puntos a evaluar en la ecuación de variación serán 250 [Quintana, 2009].

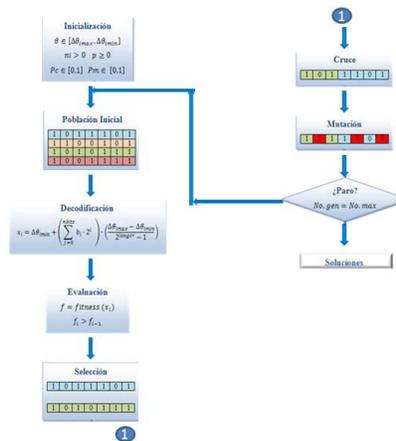
La aplicación de esta función de variación tiene muchas la ventajas; la primera, permite el uso de diferente tipos de sensores como acelerómetros, velocímetros, extensómetros, etc.; segunda, sirve para cualquier tipo de estructura; tercera, no se restringe a problemas lineales, siempre y cuando se pueda modelar el comportamiento dinámico no lineal para cualquier evento; y cuarta, no depende del tipo de prueba, por lo que evaluar vibraciones mecánicas (que se caracterizan por tener largos periodos de tiempo y bajas frecuencias) o la propagación de ondas (normalmente definida por periodos de tiempo muy cortos y contenido de altas frecuencias) [Quintana, 2009].

### 3. ALGORITMOS GENÉTICOS (AG).

Los algoritmos genéticos (AG) son un método de optimización basados en los mecanismos de selección y genética natural. Combinan la supervivencia de los más compatibles entre las estructuras de cadenas, con una estructura de información procesada aleatoriamente, intercambiada para construir un algoritmo de búsqueda con algunas de las capacidades de innovación de la búsqueda humana [Goldberg, 1989].

El poder de los AG se logra por la diversidad de los individuos de una población que evolucionan, en paralelo, siguiendo el principio de "la supervivencia del más apto". La diversidad de los individuos se obtiene y se mantiene con el operador de cruce y la mutación genética que permiten encontrar mejores soluciones y evitan la convergencia prematura a un máximo local [Holland, 1992].

- **Individuo:** Posible solución del problema.
- **Población:** Conjunto de soluciones.
- **Operador genético:** Función empleada para mantener la diversidad genética de una población.

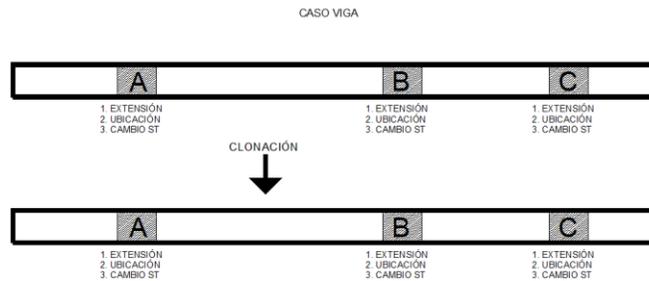


**Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo genético simple.**

La forma más simple de algoritmo genético utiliza cuatro tipos de operadores: selección, clonación, combinación y permutación.

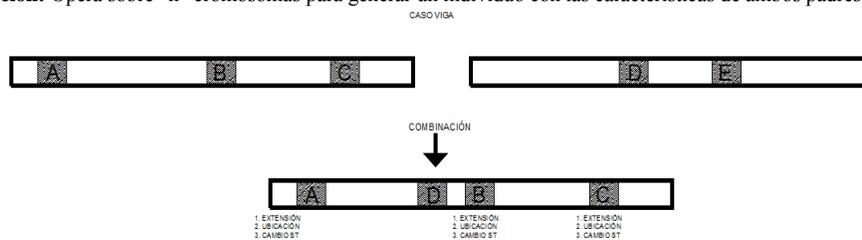
- **Selección o reproducción:** Este operador identifica y escoge los mejores individuos entre la población para efectuar la reproducción. Cuanto más capaz sea el individuo, más veces será seleccionado para reproducirse.

- **Clonación:** Con este operador se garantiza la supervivencia de los individuos mas aptos para la siguiente generación. Ver **figura 3**.



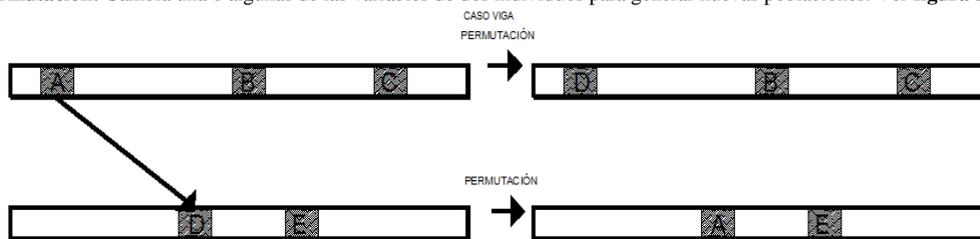
**Figura 3.** Se representa la clonación del individuo mas apto para el caso de una viga con tres daños.

- **Combinación:** Opera sobre “n” cromosomas para generar un individuo con las características de ambos padres. Ver **figura 4**.



**Figura 4.** Se representa la combinación de dos individuos para el caso de daño en vigas.

- d) **Permutación:** Cambia una o algunas de las variables de dos individuos para generar nuevas poblaciones. Ver **figura 5**.



**Figura 5.** Se representa la permutación de dos individuos para el caso de daño en vigas, este operador genera dos nuevos individuos.

Como se ve, los Algoritmos Genéticos difieren de los métodos tradicionales de búsqueda y optimización, en cuatro cuestiones esenciales:

1. Trabajan con un código del conjunto de parámetros, no con el conjunto mismo (necesitan que el conjunto de parámetros del problema de optimización esté codificado en cadenas finitas sobre un determinado alfabeto). Por trabajar a nivel de código, y no con las funciones y sus variables de control, como otros métodos, son más difíciles de “engañar”.
2. Buscan una población de puntos, no un único punto. Manteniendo una población de puntos muestrales bien adaptados, se reduce la probabilidad de caer en una cima falsa.
3. Emplean la función objetivo, no necesitan derivadas ni otra información complementaria, tan difícil a veces de conseguir. De este modo ganan en eficiencia y en generalidad.
4. Se valen de reglas de transición estocástica, no determinista. Los AG se valen de operadores aleatorios para guiar la búsqueda de los mejores puntos; puede parecer extraño, pero la Naturaleza está llena de precedentes al respecto.

Los AG han sido aplicados para desarrollar complejas tareas de optimización en varias aplicaciones prácticas. En particular, para la detección de daños en estructuras, varias propuestas han sido presentadas en la última década en un intento para diseñar un procedimiento eficaz para la detección de daños [Borges, Barbosa y Lemonge, 2006; Meruane y Heylen, 2006; Waisman, Chatzi y Smyth, 2009; Kouchmeshky, Aquino, Bongard y Lipson, 2006; Casciati, 2008; Kouchmeshky, Aquino, Bongard y Billek, 2007]. Estas estrategias por lo general presentan variaciones en los escenarios de daño por lo que es necesario un AG como optimizador del procedimiento de búsqueda de daño [Goldberg, 1989; Holland, 1992].

## 4. CONCLUSIÓN.

La evaluación de las respuestas dinámicas de la estructura con daño pueden ser comparadas con las respuestas dinámicas de la estructura representado con un modelo calibrado de elemento finito y evaluadas a través de la minimización de funciones de error. Por lo que se pretende llegar a la solución real del sistema a través de la simulación de escenarios de daño los cuales se adaptan a la condición de la estructura dañada a través de un AG, lo que abre la posibilidad de encontrar múltiples daños en una estructura y encontrar una solución exacta.

## 5. REFERENCIAS.

1. Aktan A. E., Grimmelman, K. A., "Structural identification: Analytical Aspects", Journal of Structural Engineering, 127(7): 817-829, 1999.
2. Carrión-Viramontes F. J., "Aplicación de las Funciones Intermedias en Tiempo Frecuencia al Análisis de Sistemas Sujetos a Vibración", Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería División de Postgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro, 2002.
3. Kato M., Shimada S., "Vibration of PC Bridge During Failure Process", Journal of Structural Engineering, 112(7): 1692-1703, 1986.
4. Turner J. D., Pretolve A. J., "A Study of the Spectrum of Traffic-induced Bridge Vibration", Journal of Sound and Vibration. 122: 31-42, 1988.
5. Allampalli S., Fu, G., Dillon E. W., "On the Use of Measured Vibration for Detecting Bridge Damages", Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference, San Francisco, California, U. S. A., August 28-30: 125-137, 1995
6. Allemang, R. J., Brown D. L., "A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis", Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Modal Analysis Conference, Orlando FL, 1982.
7. Ewins D. J., "Modal Testing, Practice and Application", 2<sup>nd</sup> edition, Research Studies Press LTD, Hertfordshire, England, 2000.
8. Bert C. W., "Relationship Between Fundamental Natural Frequency and Maxim Static Deflection for Various Linear Vibratory Systems", Journal of Sound and Vibration, 162(3): 547-557, 1993.
9. Linag Z., Lee, G. C., "Damping of Structures Part I", NCEER Report, NCEER 91-0004, 1994.
10. Abdel Wahab M. M., De Roeck G., "Damage Detection in bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario", Journal of Sound and Vibration, 222(2): 217-235, 1999.
11. Salawu H. J., "Detection of Structural Damage through Changes in Frequenc: A Review", Engineering Structures, 19(9): 718-723, 1997.
12. Saitoh M., Takei B. T., "Damage Estimation and Identification of Structural Faults Using Modal Parameters", Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference, Dearborn, MI, U. S. A., 1996
13. Pandey A. K., Biswas M., Samman M. M., "Damage Location from Changes in Curvature Mode Shape", Journal of Sound and Vibration, 145(2), 1991.
14. Zimmerman D. C., Kauk M., "Structural Damage Detection Using a Minimum Rank Update Theory", Transactions of the ASME, 116: 222-231, 1994
15. Carrión-Viramontes F. J., Doyle J. F., Lozano A., "Structural health Monitoring and Damage Detection using a sub-domain inverse Method", Smart Materials and Structures, 12(2003), pp 776-784, 2003.
16. Quintana J. A., "A Global Search Method for Damage Detection in General Structures", Tesis de Maestría, Astronautics and Aeronautics Department, Purdue University, U. S. A., 2004
17. Aktan A. E., Helmicki A. J., Hunt V. J., "Issues in Health Monitoring for Intelligent Infrastructure", 7(5): 674-692, 1998.
18. Fuhr P. L., Huston D. R., Kajenski P. J., Ambrose T. P., "Performance and Health Monitoring of the Stafford Medical Building Using Embedded Sensors", Journal Of smart Materials and Structures, 1(1): 63-68, 1992.
19. Inman D., "Multifunctional Structures of the Next Millennium", Structural Dynamics@2000: Current Status and Future Directions, D. J. Ewins and D. J. Inman Eds., Research Studies Press LTD, Baldock, Hertfordshire, England: 59-70, 2001.
20. Carrión-Viramontes F. J., López-López J. A., Quintana-Rodríguez J. A., Lozano-Guzmán., "Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge", Experimental Mechanics, 2007.
21. Doyle J.F., "Wave Propagation in Structures", 2/E. Springer-Verlag, New York, 1997.
22. Doyle J. F., "Modern Experimental Stress Analysis", Wiley and Sons, New York, 2004.
23. Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, Shevitz DW. "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review". Technical Report LA-1307-MS, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 1996.
24. Carden EP, Fanning P. "Vibration based condition monitoring: a review". Structural Health Monitoring 2004; 3(4):355-377.
25. Goldberg, D.E., Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. (1989), USA: Addison - Wesley.
26. Holland, J.H., Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. MIT Press, (1992).
27. Quintana J. A., "Análisis del Método de Búsqueda Global para la detección de daño y monitoreo estructural de puentes", Tesis de Doctorado, Escuela Superior de ingeniería mecánica y eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F, 2009
28. Borges C. C. H, Barbosa H.J.C, Lemonge A.C.C, "A structural damage identification method based on genetic algorithm and vibrational data" Laboratorio Nacional de Computación Científica, Petropolis, RJ, Brasil. John Wiley & Sons, Ltd. (2006)
29. Meruane V, Heylen W, "Structural damage assessment with antiresonances versus mode shapes using parallel genetic algorithms" Department of Mechanical Engineering, Universidad de Chile, Chile. John Wiley & Sons, Ltd. (2006)
30. Waisman H, Chatzi E, Smyth A.W, "Detection and quantification of flaws in structures by the extended finite element method and genetic algorithms" Department of Civil Engineering and Mechanics, Columbia University, New York, USA. John Wiley & Sons, Ltd. (2009)
31. Kouchmeshky B, Aquino W, Bongard J.C, Lipson H, "Co-evolutionary algorithm for structural damage identification using minimal physical testing" Cornell University, Ithaca, NY, USA. John Wiley & Sons, Ltd. (2006)
32. Casciati S, "Stiffness identification and damage localization via differential evolution algorithms" University of Catania, Siracusa, Italy. John Wiley & Sons, Ltd. (2008)
33. Kouchmeshky B, Aquino W, Bongard J.C, Billek A.E, "Structural damage identification using Co-evolution and frequency response functions" Cornell University, Ithaca, NY, USA. John Wiley & Sons, Ltd. (2007)