



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

DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE IMPACTOS EN PLACAS
PLANAS UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE MÁXIMA ENTROPIA.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

NICOLÁS ALONSO SÁNCHEZ TIRADO

PROFESORA GUÍA:
VIVIANA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN
JUAN CRISTÓBAL ZAGAL MONTEALEGRE

SANTIAGO DE CHILE
2016

Resumen Ejecutivo:

La presente investigación consiste en el desarrollo de un sistema de detección, localización y cuantificación de impactos en placas planas a partir de un análisis de sus respuestas vibratorias.

El estudio de detección de impactos con análisis de vibraciones se basa en obtener la deformación ocurrida tras un impacto en distintos puntos sobre una placa, para extraer la amplitud máxima y el tiempo de llegada. Con esta información se puede utilizar un método de inferencia en base a una regresión lineal para obtener la localización y la magnitud del impacto.

En trabajos disponibles en literatura se han desarrollado algoritmos de detección de impactos para estructuras simples que han demostrado funcionar bien, pero de gran costo computacional por requerir entrenamiento, además de utilizar disposiciones experimentales con una gran cantidad de sensores. En el presente trabajo se propone usar una metodología basada en una aproximación lineal que utiliza el principio de máxima entropía. La principal ventaja de esta metodología es que no requiere de entrenamiento.

En una primera etapa se construye un banco de pruebas que permite obtener datos reales de impactos en distintos puntos distribuidos sobre una placa metálica. Luego se procede a extraer los parámetros de amplitud y tiempo de llegadas para construir una base de datos. Con el algoritmo se modela un impacto desconocido como una combinación lineal de los datos contenidos en la base. Los ponderadores asociados a la combinación lineal se determinan aplicando el principio de máxima entropía.

Para llegar al algoritmo final, se realiza un procedimiento iterativo de construcción de bases de datos y aplicación del principio de máxima entropía. Se crea una base de datos a la cual se le aplica el algoritmo con un número variable de vecinos con los que construir la combinación lineal. De este, se obtiene que con una vecindad cercana al 15%, la influencia particular de cada elemento disminuye sin mejorar radicalmente el desempeño de la base, por lo que se fija esta cantidad como el número de vecinos a ocupar.

Se realiza otra serie que parte con una base que solo extrae el máximo global de las señales y se obtiene un 3.5% de error de área en la localización y un 15.53% de error en la fuerza. Luego se crea una base que contiene distintas magnitudes de fuerza aplicada para un mismo punto, permitiendo contar con vecinos con amplitudes similares a las de la prueba. Posteriormente se crea otra base de datos que incluye a la anterior e incorpora los valores de tiempos ponderados en el mismo orden de magnitud de las amplitudes. Finalmente se usa una base de datos con la experiencia anterior, donde también se extrae el máximo global para la amplitud y el primer máximo local para el tiempo, esta base resulta con un promedio de error de área del 0.28% y un promedio de error de fuerza del 9.9%.

AGRADECIMIENTOS.

Sería un completo error decir que este, uno de mis logros más importantes, es producto únicamente de mi esfuerzo personal. A lo largo de toda mi carrera universitaria –y mi vida– fui ayudado, aconsejado, enseñado y apoyado por una multitud de personas, son todos ellos mi pequeña “comunidad imaginada” a quienes quiero agradecer en este espacio.

En primer lugar quiero dar las gracias a mi profesora guía, Viviana Meruane, por estar siempre dispuesta a resolver mis dudas y ayudarme a mejorar el algoritmo diseñado, y lo más importante, por el voto de confianza que fue aceptarme como su memorista. Tampoco puedo dejar de agradecer la ayuda prestada por los profesores Alejandro Ortiz y Juan Cristóbal Zagal quienes a me incentivaron a darle nuevas perspectivas a este trabajo.

Quiero dar las gracias a todos los docentes y funcionarios y compañeros –en especial a mi generación de Máquinas– del Departamento de Ingeniería Mecánica, quienes de una u otra manera son responsables de que este departamento sea un lugar al que se pueda pertenecer.

Todo agradecimiento que pudiera escribirle a familia se quedaría corto frente a todo lo que me han dado, porque ellos son mi memoria y mi historia, porque ellos me dieron la biblioteca, el amor y el compás; y porque ellos, con sus sacrificios, han sido la fundación sobre la que he construido mis logros.

A Camila, mi compañera, por consolarme, por levantarme, por sostenerme, por guiarme, por acompañarme, por enseñarme, por alegrarme, por quererme.

A los 12, quienes con su amistad me dieron momentos muy especiales, que me ayudaron a superar las etapas más difíciles de este proceso.

A los Malenkos, por acompañarme en la lejana y difícil etapa escolar y seguir con su amistad hasta hoy en día.

¡Gracias!

TABLA DE CONTENIDO.

1.	Introducción.....	1
1.1.	Antecedentes Generales.....	1
1.2.	Motivación.....	2
1.3.	Objetivos.....	3
1.3.1.	Objetivo General.....	3
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	3
1.4.	Alcances.....	3
2.	Marco teórico.....	4
2.1.	Vibraciones Mecánicas en un sistema de un grado de libertad.....	4
2.2.	Respuesta de un sistema de un grado de libertad a un impulso.....	8
2.3.	Procesamiento de señales.....	11
2.4.	Método de aproximación lineal basado en el principio de máxima entropía.....	14
2.5.	Multiplicadores de Lagrange.....	17
2.6.	Evaluación de métodos de detección de impactos.....	19
3.	Metodología.....	22
3.1.	Diseño y construcción del montaje experimental.....	22
3.2.	Recolección de datos para la base de datos y set de pruebas.....	22
3.3.	Construcción de las bases de datos, set de validación y aplicación del método de máxima entropía.....	23
3.4.	Discusión y Conclusiones.....	23
4.	Montaje experimental.....	25
5.	Aplicación de la aproximación lineal mediante el principio de máxima entropía.....	30
5.1.	Número de Vecinos, Gamma y desempeño de la base.....	30
5.2.	Base sin alteraciones-Max (BSA-MAX).....	32
5.3.	Base con amplitudes normalizadas – MAX (BIN-MAX).....	37
5.4.	Base con amplitudes normalizadas y tiempo ponderados – MAX (BINTP-MAX).....	42
5.5.	Base con amplitudes normalizadas y tiempo ponderados – FINDPEAKS (BINTP-FP).....	46
6.	Discusiones.....	52
6.1.	Número de Vecinos, gamma y desempeño de la base.....	52
6.2.	Resultados.....	53
7.	Conclusiones.....	56
8.	Bibliografía.....	57

A.	Posiciones de los Impactos	59
A.1	Set de impacto para base de datos:	59
A.2	Set de impactos para pruebas.	62
B.	Anexos: Códigos de Importancia.....	65
B.1	Función: Tabular Carpetas.	65
B.2	Función: Filtrar Señales.	66
B.3	Función: Normalizar Fuerzas.	68
B.4	Función: Ponderar Tiempos.	71
B.5	Función: Evaluar Base Vecinos.....	72
B.6	Función Evaluar Base.	73
B.7	Porcentaje Óptimo.	75
B.8	Función: Caja Madre Porcentaje.	76
B.9	Función: Filtrar Señales Porcentaje.....	79
B.10	Función: Evaluar Base Silente.	80
C.	Resultados de BSA-FP y BIN – FP.	81
C.1	Resultados de BSA – FP.....	81
C.2	Resultados BIN – FP.....	85

Índice de Tablas.

Tabla 4.1 Propiedades del Aluminio Al6061.....	26
Tabla 4.2 Características del sensor piezoeléctrico 7BB-20-6L0.	26
Tabla 4.3 Características del martillo modal.	27
Tabla 4.4 Características ECON-MI7016 tarjeta de adquisición usada.	27
Tabla 5.1 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BSA-MAX.....	32
Tabla 5.2 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BIN-MAX.....	37
Tabla 5.3 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BINTP-MAX.	42
Tabla 5.4 Resultados de errores mínimos de área y fuerza según amplitud admisible.....	48
Tabla 5.5 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BINTP-FP.	48
Tabla 6.1 Resultados comparados para localización de impactos.	55
Tabla A.1 Posición de los impactos para la base de datos.....	59
Tabla A.2 Posición de los impactos para pruebas.	62
Tabla C.1 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BSA-FP.....	81
Tabla C.2 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BIN-FP.	85

Índice de Figuras.

Figura 1.1 Respuesta en un grado de libertad a un impulso ocurrido en $t = 0$.	1
Figura 2.1 Sistema de un grado de libertad con amortiguamiento [2].	4
Figura 2.2 Respuesta de un sistema sobreamortiguado [2].	6
Figura 2.3 Respuesta de un sistema con amortiguamiento débil [2].	8
Figura 2.4 Fuerza tipo impulso en el tiempo [2].	9
Figura 2.5 Respuesta de un sistema de un grado libertad a un impulso en un tiempo t [2].	11
Figura 2.6 Ventana rectangular [3].	12
Figura 2.7 Señal de la fuerza del impacto.	13
Figura 2.8 Envolvente de la fuerza de impacto.	14
Figura 4.1 Esquema de disposición experimental.	26
Figura 4.2 Posición de los impactos en la placa para la base de datos.	28
Figura 4.3 Posición de los impactos en la placa para el set de pruebas.	29
Figura 5.1 Variación de los porcentajes de error de área y fuerza según el número de vecinos (BSA-MAX).	31
Figura 5.2 Variación de Gamma según el número de vecinos (BSA-MAX).	32
Figura 5.3 Coordenada X experimental y estimada con BSA-MAX.	33
Figura 5.4 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BSA-MAX.	34
Figura 5.5 Coordenada Y experimental y estimada con BSA-MAX.	34
Figura 5.6 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BSA-MAX.	35
Figura 5.7 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BSA-MAX.	35
Figura 5.8 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BSA-MAX.	36
Figura 5.9 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BSA-MAX.	36
Figura 5.10 Coordenada X experimental y estimada con BIN-MAX.	38
Figura 5.11 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BIN-MAX.	39
Figura 5.12 Coordenada Y experimental y estimada con BIN-MAX.	39
Figura 5.13 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BIN-MAX.	40
Figura 5.14 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BIN-MAX.	40
Figura 5.15 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BIN-MAX.	41
Figura 5.16 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BIN-MAX.	41
Figura 5.17 Coordenada X experimental y estimada con BINTP-MAX.	43
Figura 5.18 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BINTP-MAX.	43
Figura 5.19 Coordenada Y experimental y estimada con BIN-MAX.	44
Figura 5.20 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BINTP-MAX.	44
Figura 5.21 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BINTP-MAX.	45
Figura 5.22 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BINTP-MAX.	45
Figura 5.23 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BINTP-MAX.	46
Figura 5.24 Resultado de Error de área y de fuerza según amplitud admisible.	47
Figura 5.25 Coordenada X experimental y estimada con BINTP-FP.	48
Figura 5.26 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BINTP-FP.	49

Figura 5.27 Coordenada Y experimental y estimada con BINTP-FP.....	49
Figura 5.28 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BINTP-FP..	50
Figura 5.29 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BINTP-FP.....	50
Figura 5.30 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BINTP-FP.....	51
Figura 5.31 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BINTP-FP.....	51
Figura 6.1 Comparación de señal de fuerza y señal de deformación ele tiempo.....	54
Figura C.1 Coordenada X experimental y estimada con BSA-FP.....	81
Figura C.2 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BSA-FP.....	82
Figura C.3 Coordenada Y experimental y estimada con BSA-FP.....	82
Figura C.4 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BSA-FP.....	83
Figura C.5 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BSA-FP.....	83
Figura C.6 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BSA-FP.....	84
Figura C.7 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BSA-FP.....	84
Figura C.8 Coordenada X experimental y estimada con BIN-FP.....	85
Figura C.9 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada X para el caso BIN-FP.....	86
Figura C.10 Coordenada Y experimental y estimada con BIN-FP.....	86
Figura C.11 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BIN-FP.....	87
Figura C.12 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BIN-FP.....	87
Figura C.13 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BIN-FP.....	88
Figura C.14 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BIN-FP.....	88

Lista de signos.

Símbolo	Significado	Ubicación	
		Ecuación	Página
H	Entropía de un sistema.	(1.1)	2
p_a	Probabilidad de ocurrencia un evento discreto x_a .	(1.1)	2
$g_r(x_a)$	Función de densidad de probabilidad para un evento discreto x_a .	(1.4)	2
E	Esperanza de la función generadora g_r para un set de eventos discretos.	(1.4)	2
m	Masa del sistema.	(2.1)	4
$\ddot{x}(t)$	Aceleración de la masa m en t .	(2.1)	4
c	Coeficiente de amortiguación.	(2.1)	4
$\dot{x}(t)$	Velocidad de la masa m en t .	(2.1)	4
k	Constante de rigidez.	(2.1)	4
$x(t)$	Posición de la masa m en t .	(2.1)	4
A_i	i -ésima constante indeterminada de la solución de (2.1)	(2.2)	5
λ_i	i -ésima solución propuesta de la ecuación (2.1)	(2.2)	5
c_c	Amortiguamiento crítico de un sistema.	(2.5)	5
w_n	Frecuencia natural de un sistema.	(2.5)	5
ζ	Razón de amortiguamiento.	(2.6)	5
w_d	Frecuencia natural amortiguada.	(2.13)	7
ϕ	Constante angular de desfase para la solución de (2.1).	(2.16)	7
\hat{F}	Intensidad del impacto.	(2.17)	9
2ϵ	Duración del impacto.	(2.17)	9
$I(t)$	Intensidad de un impacto en el tiempo.	(2.18)	9
v_0	Velocidad inicial del sistema.	(2.19)	10
Δv	Diferencia de velocidad.	(2.20)	10
$h(t)$	Función de respuesta a un impulso unitario.	(2.22)	10
$s(t)$	Señal cualquiera en el tiempo.	(2.24)	12
$s_h(t)$	Transformada de Hilbert de la señal $s(t)$.	(2.24)	12
$a(t)$	Señal analítica de $s(t)$.	(2.25)	12
i	Unidad Imaginaria $\sqrt{-1}$	(2.25)	12
$e(t)$	Envolvente de la señal $s(t)$.	(2.26)	13
Y^j	Vector de datos observados del impacto j .	(2.27)	14
y_m^j	m -ésima característica observada -coordenada \hat{x} , \hat{y} o intensidad \hat{F} - del impacto j .	(2.27)	14
X^j	Vector de propiedades del impacto j asociadas a Y^j .	(2.28)	14
x_m^j	m -ésima propiedad -tiempo de llegada o amplitud máxima - del impacto j .	(2.28)	14
X	Vector de propiedades asociadas a un Y desconocido.	(2.29)	15
w_j	Factor de ponderación para el impacto j .	(2.29)	15
A	Forma matricial que contiene todos los X^j conocidos.	(2.31)	15

ω	Vector con todos w_j correspondientes a la suma ponderada de los X^j .	(2.31)	15
b	Forma vectorial de X .	(2.31)	15
X_n	n -ésima propiedad de X .	(2.33)	15
Y	Vector de características que por conocer, que posee una relación lineal con X .	(2.35)	15
m_a	Distribución previa que se asume para p_a .	(2.40)	16
β_j	Parámetro de la distribución gaussiana para m_j .	(2.44)	17
h_j	Distancia euclidiana entre los vecinos del j – ésimo impacto.	(2.45)	17
A_m^n	Amplitud máxima de la deformación del sensor m del n – ésimo impacto.	(2.46)	17
t_m^n	Tiempo que transcurre entre el máximo global de la fuerza y un máximo (global o local) de la deformación del sensor m del impacto n .	(2.46)	17
x_n	Posición en la coordenada \hat{x} del n – ésimo impacto.	(2.47)	17
y_n	Posición en la coordenada \hat{y} del n – ésimo impacto.	(2.47)	17
F_n	Máximo global de la señal de fuerza en n – ésimo impacto.	(2.47)	17
$\mathcal{L}(x, \lambda)$	Función lagrangiana o Lagrangiano.	(2.51)	18
$f(x)$	Función objetivo del lagrangiano.	(2.51)	18
$g_k(x)$	k – ésima condiciones del lagrangiano.	(2.51)	18
λ_r	r – ésimo multiplicador de lagrange.	(2.51)	18
$\nabla[\mathcal{L}]$	Gradiente de la función \mathcal{L} .	(2.52)	18
$\delta[\mathcal{L}]$	Derivada parcial de la función \mathcal{L} respecto de una de sus variables.	(2.53)	18
Z	Función partición.	(2.56)	19
E_x	Error promedio en la coordenada \hat{x} .	(2.61)	19
$x_n^{\{R,E\}}$	Posición en la coordenada \hat{x} del n – ésimo impacto. R o E indican si es el valor medido o estimado.	(2.61)	19
N	Numero de impactos del set de validación utilizado.	(2.61)	19
d_x	Tamaño total de la placa en la coordenada \hat{x} .	(2.62)	19
E_y	Error promedio en la coordenada \hat{y} .	(2.62)	19
$y_n^{\{R,E\}}$	Posición en la coordenada \hat{y} del n – ésimo impacto. R o E indican si es el valor medido o estimado.	(2.62)	19
d_y	Tamaño total de la placa en la coordenada \hat{y} .	(2.62)	19
E_A	Error promedio de área.	(2.63)	20
A	Área total de la placa.	(2.63)	20
E_F	Error promedio en la intensidad del impacto \hat{F} .	(2.64)	20
$F_k^{\{R,E\}}$	Intensidad \hat{F} del n – ésimo impacto. R o E indican si es el valor medido o estimado.	(2.64)	20
η	Eficiencia de la precisión.	(2.65)	20
N_s	Numero de sensores utilizados.	(2.65)	20
N_D	Número de impactos utilizados.	(2.65)	20

α	Factor de normalización de la fuerza.	(5.1)	37
β	Factor de ponderación del tiempo.	(5.3)	42

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. ANTECEDENTES GENERALES.

1.1.1 Análisis de Vibraciones.

El análisis de vibraciones se basa en que todo sólido, al ser sometido a un estímulo adecuado, muestra respuestas vibratorias que le son características y que vienen dadas de sus propiedades físicas y forma. Al conocerse las respuestas vibratorias típicas de una estructura, se pueden crear algoritmos que permitan conocer ciertas características de la excitación inicial

Un caso especial del análisis de vibraciones es el estudio de respuestas a impactos, que se encuentra centrado en determinar su posición y magnitud. En la Figura 1.1 se observa la el comportamiento típico de una masa con un solo grado de libertad frente a un impulso: una vibración que se atenúa en el tiempo hasta llegar a cero. Del estudio de la amplitud y la diferencia de tiempo que existen entre las señales vibratorias en distintos puntos del sólido –al menos tres para una placa plana- se puede estimar la ubicación y la fuerza de un impacto.

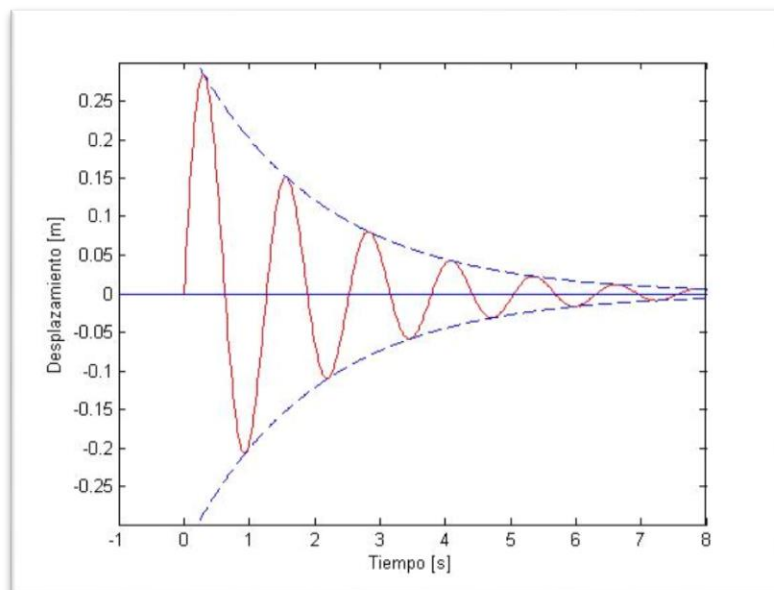


Figura 1.1 Respuesta en un grado de libertad a un impulso ocurrido en $t = 0$.

1.1.2 Principio de máxima entropía (PME).

La entropía de la información o entropía de Shannon puede ser entendida como la cantidad de incertidumbre que se recibe desde una señal cualquiera o como la cantidad de información que porta la señal, por lo tanto el PME propone que en una distribución de probabilidades para cierta señal, la menos sesgada que se le pueda atribuir será aquella que dadas las condiciones del problema, posea la mayor entropía posible.

Si se tiene una serie de N eventos discretos $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, dónde la posibilidad de cada evento es $p_a = p(x_a) \in [0,1]$, la incertidumbre asociada a cada p_a es $-\ln(p_a)$.

Entonces la entropía puede ser expresada como se ve (1.1) por lo tanto el PME es aquel que asegura (1.2) cumpliendo las condiciones (1.3) y (1.4) donde E es la esperanza asociada.

$$H = - \sum_{a=1}^N p_a \cdot \ln(p_a) \quad (1.1)$$

Donde:

- H : Entropía de la serie de N eventos discretos $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$.
- p_a : Probabilidad de ocurrencia del evento x_a .

$$\max_{p \in R^+} \left[- \sum_{a=1}^N p_a \cdot \ln(p_a) \right] \quad (1.2)$$

$$\sum_{a=1}^N p_a = 1 \quad (1.3)$$

$$\sum_{a=1}^N p_a \cdot g_r(x_a) = E \quad (1.4)$$

Donde:

- $g_r(x_a)$: Función de densidad para x_a .
- E : Esperanza de la función de densidad g_r .

1.2. MOTIVACIÓN.

Dentro de los nuevos estudios realizados sobre las fallas catastróficas de componentes aeronáuticos, destaca el “*Barely Visible Impact Damage*” (BVID) definido como aquel que produce una alteración en la integridad de una pieza pero que no puede ser detectado a simple vista. En el ámbito aeronáutico cobra especial importancia debido a que este tipo de

daño puede ser precursor de fallas catastróficas y facilitar la fatiga de material [1]. Una forma de predecir posibles daños en una estructura es identificar fuerzas que puedan causar estos daños.

Por esta razón se propone usar una metodología para la detección de impactos basada en el principio de máxima entropía, que es capaz de resolver este tipo de problemas con mayor eficiencia y sin requerir de entrenamiento como otros métodos.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL.

El objetivo general es:

- Desarrollar una metodología para la detección, localización y cuantificación de la intensidad de impactos en placas planas utilizando el método de la máxima entropía.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Los objetivos específicos son:

- Diseño y construcción de un montaje experimental para la detección de impactos.
- Adquisición de datos de impactos reales para el desarrollo de la metodología de detección.
- Desarrollo de una metodología de detección de impactos que sea capaz de entregar estimaciones de posición y magnitud similares a las del estado del arte.
- Comparación de los resultados obtenidos con otros algoritmos disponibles en la literatura.
- Compilación del trabajo realizado y de los resultados obtenidos en el informe final.

1.4. ALCANCES.

En el presente trabajo se desarrollará una metodología para enfrentar el problema de la identificación de impactos en una placa utilizando el principio de máxima entropía, las comparaciones con otros métodos aplicados se harán en base a la literatura disponible.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. VIBRACIONES MECÁNICAS EN UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.

Se considera un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento aquel solo permite movimiento en una dirección y cuenta con un elemento elástico de constante k y un elemento de amortiguación o disipación de energía de constante c . El sistema se encuentra representado gráficamente en Figura 2.1 Sistema de un grado de libertad con amortiguamiento. y matemáticamente en la ecuación (2.1).

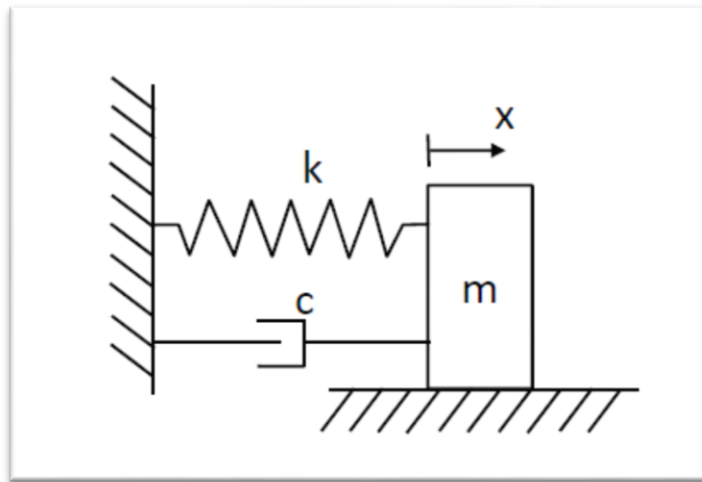


Figura 2.1 Sistema de un grado de libertad con amortiguamiento [2].

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2.1)$$

Donde:

- m : Masa puntual.
- x : Posición de la masa m .
- \dot{x} : Velocidad de la masa m .
- \ddot{x} : Aceleración de la masa m .
- k : Constante de rigidez del resorte.
- c : Coeficiente de amortiguamiento.

Para el caso de una respuesta libre (sin la presencia de fuerzas externas tras $t = 0$) esta ecuación diferencial se puede resolver de asumiendo que $x(t) = Ae^{\lambda t}$ de manera que (2.1) puede expresarse como (2.2)

$$mA\lambda^2 e^{\lambda t} + cA\lambda e^{\lambda t} + kAe^{\lambda t} = 0 \quad (2.2)$$

Donde:

- $Ae^{\lambda t}$: Solución $x(t)$ propuesta la ecuación diferencial (2.1).
- A : Constante espacial a determinar.
- λ : Constante temporal a determinar.

De manera que (2.2) queda cómo una ecuación cuadrática de incógnita λ en (2.3)

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0 \quad (2.3)$$

Las soluciones de (2.3) son las mostradas en (2.4):

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2m} \sqrt{c^2 - 4km} \quad (2.4)$$

La forma de la respuesta está dada por el signo del discriminante $c^2 - 4km$. Así se define el concepto de amortiguamiento crítico como se muestra en la ecuación (2.5)

$$c_c = 2mw_n = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.5)$$

Donde:

- c_c : Amortiguamiento crítico.
- w_n : Frecuencia natural del sistema.

A partir de (2.5) se define la razón de amortiguamiento (2.6)

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2.6)$$

Donde:

- ζ : Razón de amortiguamiento.

Así la solución general a la ecuación (2.1) puede escribirse como (2.7):

$$x(t) = e^{\zeta w_n t} (A_1 e^{t\sqrt{\zeta^2 - 1}} + A_2 e^{-t\sqrt{\zeta^2 - 1}}) \quad (2.7)$$

Donde:

- A_1 y A_2 : Constantes de la ecuación diferencial que se obtienen de las condiciones iniciales del problema.

Dependiendo del valor de la razón de amortiguamiento, la vibración puede tomar valores tal que: $\zeta < 1$, caso que se define como vibración con amortiguamiento débil; $\zeta > 1$ que se define como sobreamortiguado y caso de amortiguamiento crítico en el $\zeta = 1$.

En el caso de un sistema con sobreamortiguamiento ($\zeta > 1$) se obtienen dos raíces reales para la ecuación (2.3).

$$\lambda_1 = -\zeta w_n - w_n \sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.8)$$

$$\lambda_2 = -\zeta w_n + w_n \sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.9)$$

Y la solución general corresponde a (2.10) donde las constantes A_1 y A_2 se obtienen de las condiciones iniciales del problema. La forma de esta respuesta no es oscilatoria, si no que decae exponencialmente hacia su posición de equilibrio como se muestra en la Figura 2.2.

$$x(t) = e^{-\zeta w_n t} (A_1 e^{w_n \sqrt{\zeta^2 - 1} t} + A_2 e^{-w_n \sqrt{\zeta^2 - 1} t}) \quad (2.10)$$

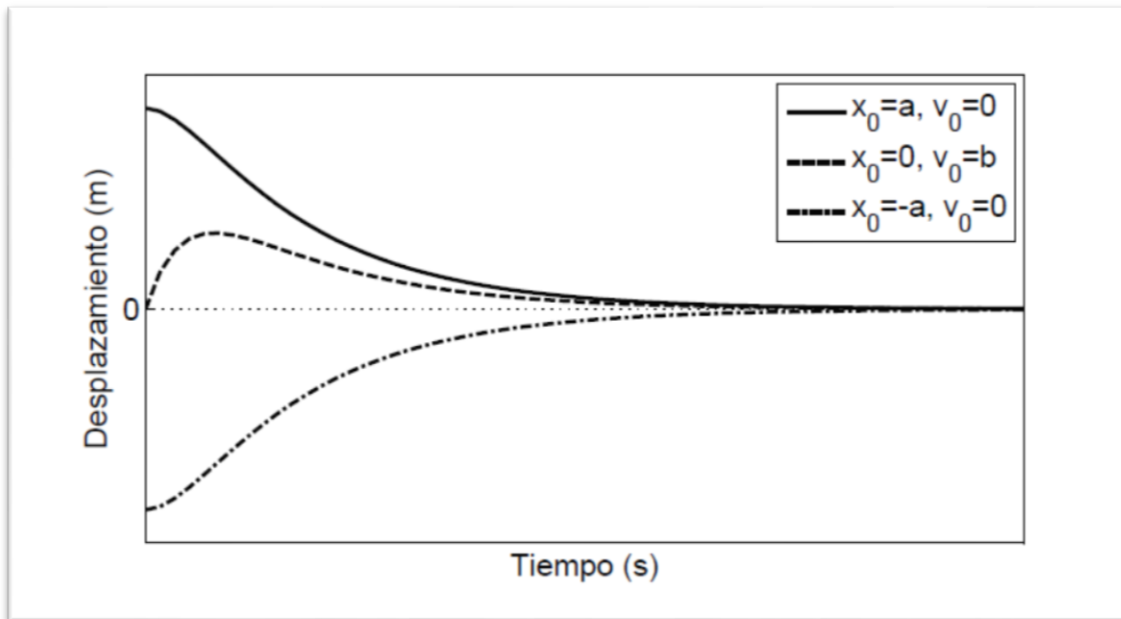


Figura 2.2 Respuesta de un sistema sobreamortiguado [2].

Para el caso crítico ($\zeta = 1$) el discriminante (2.5) es cero, resultando que las raíces de (2.4) son idénticas (2.11).

$$\lambda_1 = \lambda_2 = -w_n \quad (2.11)$$

La solución a la ecuación (2.1) en este caso corresponde a (2.12), nuevamente las constantes A_1 y A_2 se obtienen de las condiciones iniciales. Un sistema con amortiguamiento crítico se considera como aquella respuesta oscilatoria que tiende más rápidamente hacia la posición de equilibrio y separa las respuestas oscilatorias de las no oscilatorias.

$$x(t) = (A_1 + A_2)e^{-w_n t} \quad (2.12)$$

Para un sistema con amortiguamiento débil ($\zeta < 1$) se obtienen dos soluciones complejas y conjugadas (2.13) y (2.14) a la ecuación (2.3).

$$\lambda_1 = -\zeta w_n - jw_d \quad (2.13)$$

$$\lambda_2 = -\zeta w_n + jw_d \quad (2.14)$$

Donde:

- w_d : Frecuencia natural amortiguada.
- Se define la frecuencia natural amortiguada w_d como (2.15).

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.15)$$

La solución general a la ecuación (2.1) en un sistema con amortiguamiento débil queda como expresada en (2.16) y en la Figura 2.3. A y ϕ quedan determinados por las condiciones iniciales del problema.

$$x(t) = Ae^{-\zeta w_n t} \text{sen}(w_d t + \phi) \quad (2.16)$$

Donde:

- A : Constante de amplitud a determinar con las condiciones iniciales.
- ϕ : Constante angular de desfase a determinar con las condiciones iniciales.

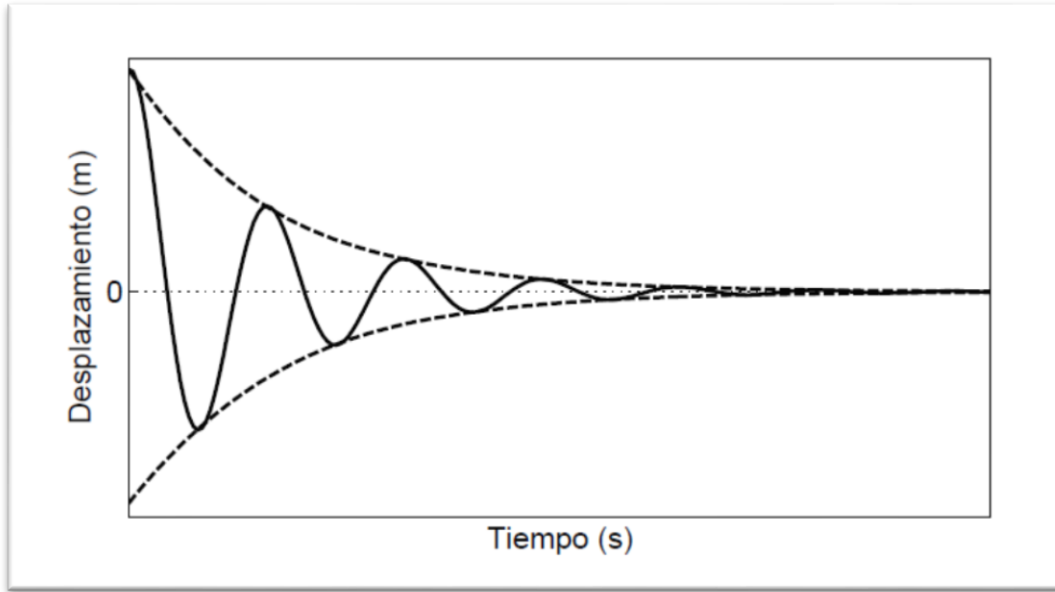


Figura 2.3 Respuesta de un sistema con amortiguamiento débil [2].

2.2. RESPUESTA DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD A UN IMPULSO.

El impacto o carga de impacto es definido en mecánica de sólidos como la aplicación de una fuerza no periódica durante un lapso de tiempo muy breve en comparación al período $T = 2\pi/w_n$; donde w_n corresponde a la frecuencia natural de la estructura.

Matemáticamente un impulso puede ser representado como se muestra en (2.17), su representación gráfica se muestra en la Figura 2.4.

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t \leq \tau - \epsilon \\ \frac{\hat{F}}{2\epsilon} & \tau + \epsilon \leq t \leq \tau - \epsilon \\ 0 & t \geq \tau + \epsilon \end{cases} \quad (2.17)$$

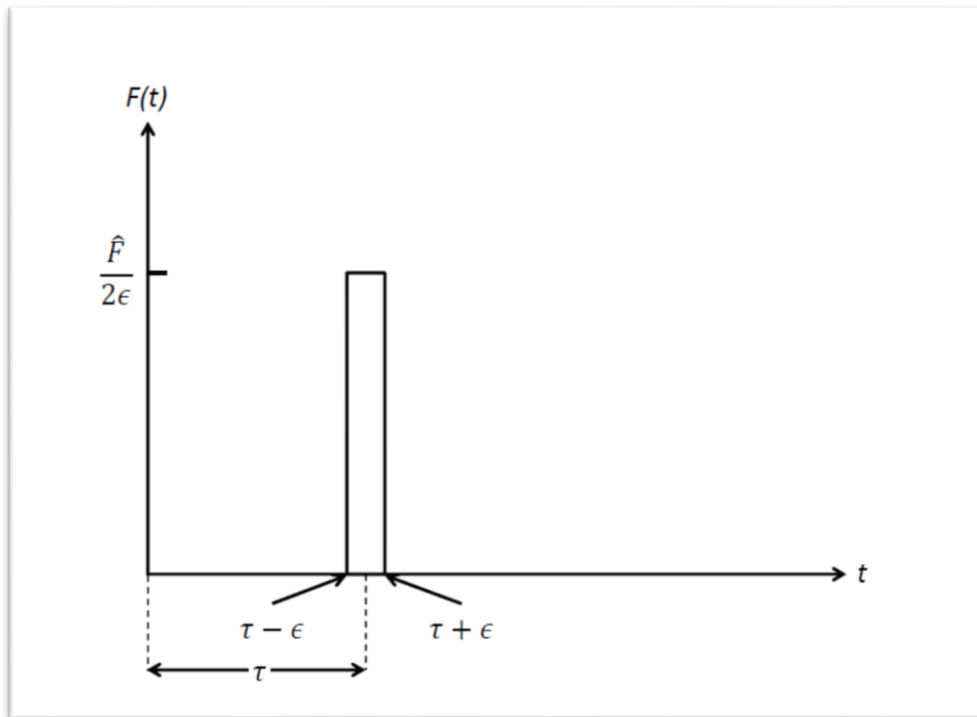


Figura 2.4 Fuerza tipo impulso en el tiempo [2].

Dónde:

- τ : Tiempo en que ocurre el impacto.
- 2ϵ : Duración del impacto.

Al integrar (2.18) en el tiempo se obtiene la definición de Impulso.

$$I(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) dt = \frac{\hat{F}}{2\epsilon} 2\epsilon = \hat{F} \quad (2.18)$$

Donde:

- $I(t)$: Fuerza del impulso en el tiempo.
- \hat{F} : Intensidad del impulso en $[N]$.

La definición (2.18) es sólo válida si $\epsilon \neq 0$, sin embargo si se aplica el límite cuando $\epsilon \rightarrow 0$, la integral resultante es $I(\epsilon) = \hat{F}$

Si consideramos un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento, donde el impacto se produce en $\tau = 0$, se tiene que en el instante inmediatamente anterior al impacto el desplazamiento y la velocidad del sistema son cero también $x(0^-) = \dot{x}(0^-) = 0$. En el momento posterior al impacto se encuentra también con un desplazamiento nulo, sin embargo la velocidad se puede obtener del cambio de momento tras el impacto:

$$m\dot{x}(0^-) - m\dot{x}(0^+) = mv_0 \quad (2.19)$$

Donde:

- $\dot{x}(0^-)$: Velocidad en el instante inmediatamente anterior del impacto.
- $\dot{x}(0^+)$: Velocidad en el instante inmediatamente posterior del impacto.
- v_0 : Velocidad inicial del sistema.

Y cómo el impulso puede ser descrito cómo la variación de momentum que experimenta un cuerpo, se obtiene (2.20):

$$I = \hat{F} = m\Delta v = mv_0 \quad (2.20)$$

Por lo tanto la velocidad inicial v_0 del sistema es \hat{F}/m . Por lo que el sistema de un grado de libertad con amortiguamiento queda definido como se muestra en (2.21).

$$\begin{aligned} x(0) &= 0 \\ \dot{x}(0) &= \hat{F}/m \\ m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Donde:

$x(0)$: Posición inicial del sistema.

$\dot{x}(0)$: Velocidad inicial del sistema.

La respuesta a la ecuación diferencial de (2.21) con las condiciones iniciales mencionadas para un sistema sub-amortiguado ($0 < \zeta < 1$) tiene como respuesta (2.22):

$$x(t) = \hat{F}h(t) \quad (2.22)$$

Donde:

- $x(t)$: Respuesta a la ecuación diferencial (2.21).
- $h(t)$: Función de respuesta a un impulso unitario (2.23).

La función $h(t)$ es conocida como la función respuesta al impulso unitario y es de la forma (2.23), y posee la forma que se muestra en la Figura 2.5.

$$h(t) = \frac{1}{mw_d} e^{-\zeta w_n t} \text{sen}(w_d t) \quad (2.23)$$

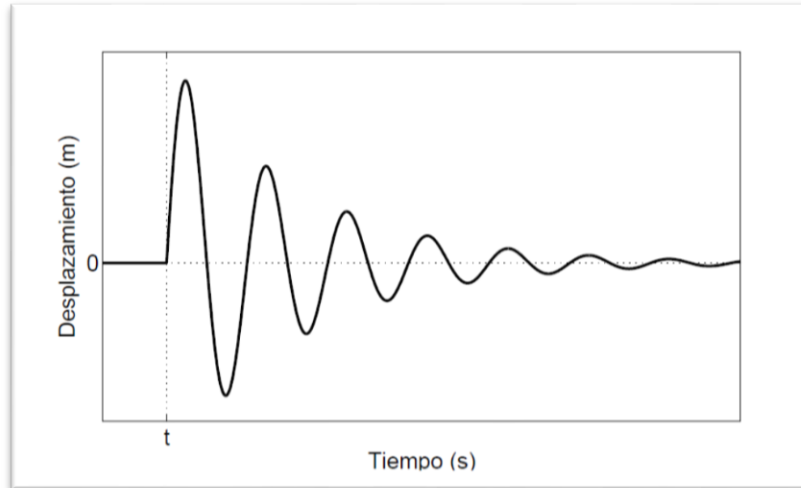


Figura 2.5 Respuesta de un sistema de un grado libertad a un impulso en un tiempo t [2].

2.3. PROCESAMIENTO DE SEÑALES.

2.3.1. Ventanas

Las ventanas rectangulares se utilizan para acotar temporalmente una señal, permitiendo disponer de una cantidad finita de información, pueden representarse gráficamente como se observa en la Figura 2.6.

Para el presente trabajo se requiere escoger una ventana cuya duración permita capturar la mayor cantidad de información relevante. Dado que la respuesta del impulso en una placa plana posee amplitudes explícitas hasta 0.06 segundos [1], se adopta un tiempo de adquisición que varía entre 9 a 10 segundos.

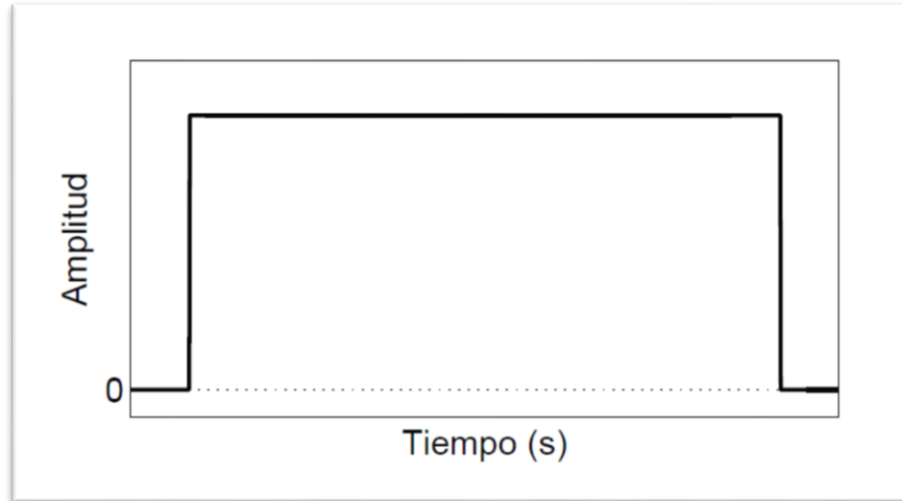


Figura 2.6 Ventana rectangular [3].

2.3.2. Transformada de Hilbert.

Para el presente trabajo se necesitan señales en las que los máximos sean identificables y se pueda notar claramente el tiempo de desfase entre señales, por ello que se utiliza la Transformada de Hilbert, puesto que con ella es posible construir una señal analítica (enteramente positiva) de las amplitudes de una señal en cada momento.

La transformada de Hilbert puede se define en (2.24)

$$s_h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.24)$$

Donde:

- $s(t)$: Señal original en el tiempo.
- $s_h(t)$: Transformada de Hilbert de la señal $s(t)$.

La señal analítica se construyendo como con la señal como la parte real y transformada de Hilbert como la parte compleja como se muestra en (2.25)

$$a(t) = s(t) + i \cdot s_h(t) \quad (2.25)$$

Donde:

- $a(t)$: Señal analítica de $s(t)$.
- i : Unidad imaginaria $\sqrt{-1}$.

Finalmente, se calcula en (2.26) la envolvente de la señal, la cual nos entrega el valor de los extremos de la amplitud de la señal en cada momento.

$$e(t) = \sqrt{s^2(t) + s_h^2(t)} \quad (2.26)$$

Donde:

- $e(t)$: Envoltente de la señal $s(t)$.

El procedimiento descrito permite pasar de una señal de fuerza como la que se muestra en la Figura 2.7 a lo que se muestra en la Figura 2.8. La envoltente de la señal resulta adecuada para extraer los valores de amplitud máxima y tiempo en que ocurre la amplitud máxima en las señales de fuerza y deformación.

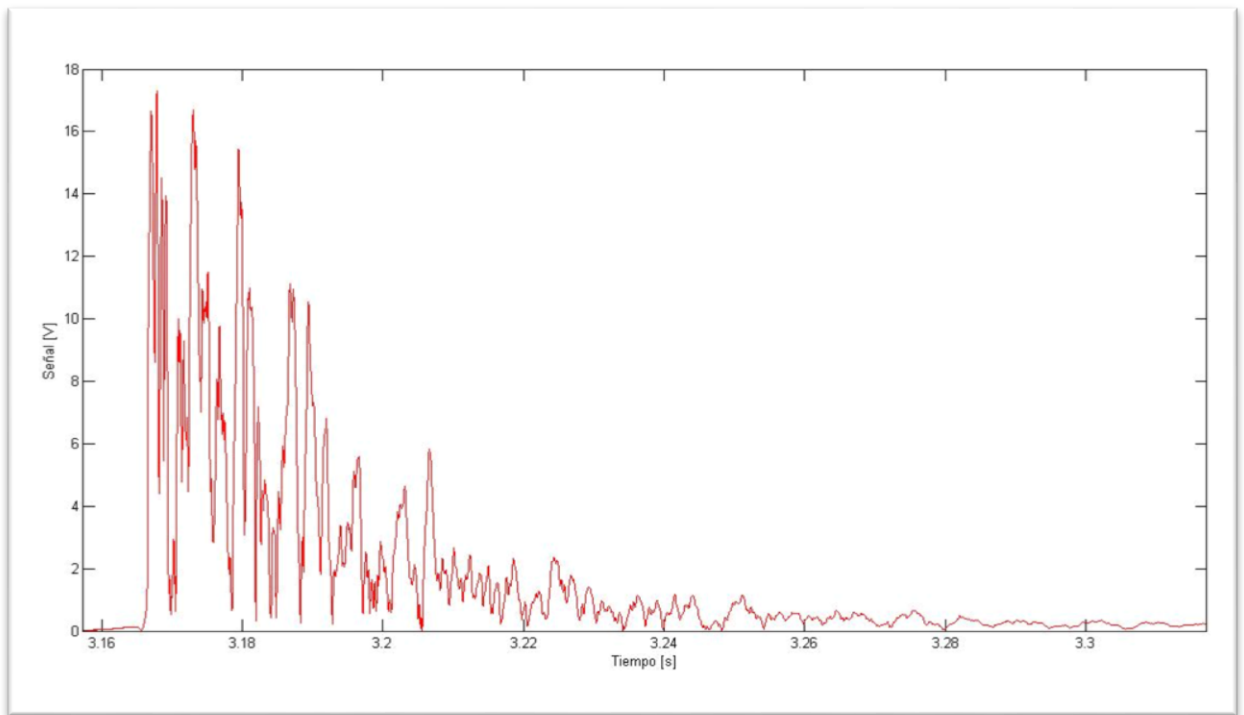


Figura 2.7 Señal de la fuerza del impacto.

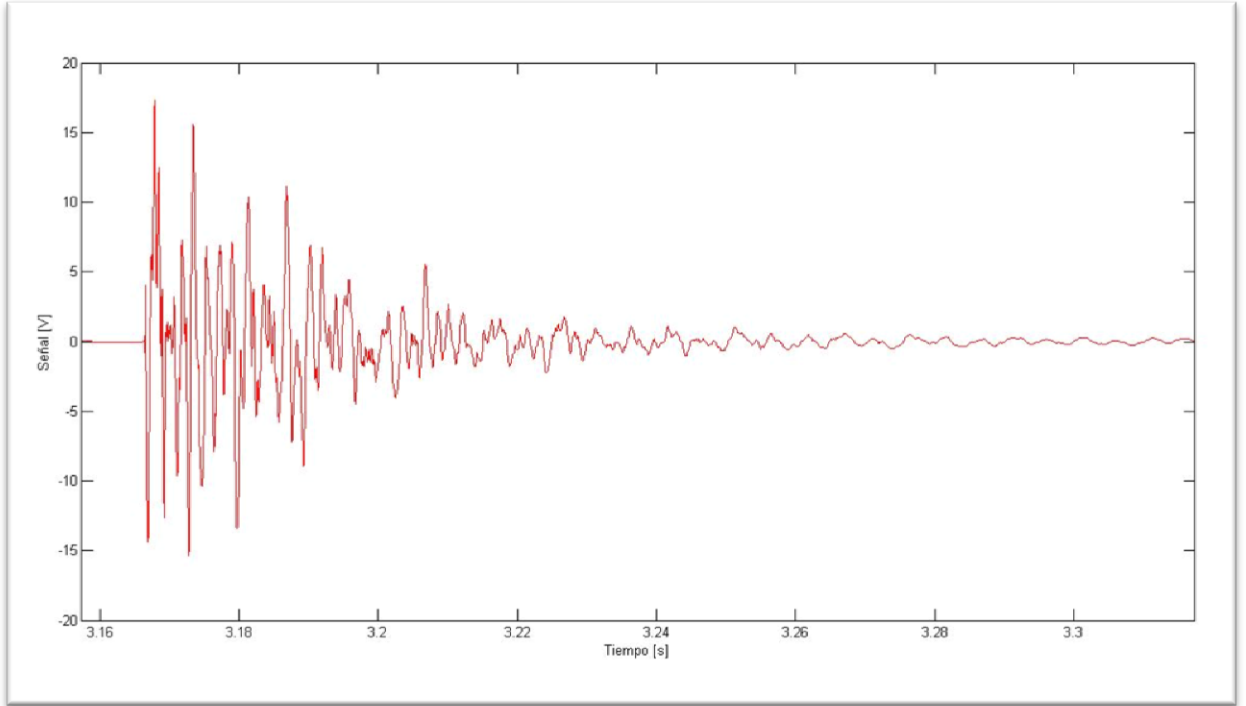


Figura 2.8 Envolvente de la fuerza de impacto.

2.4. MÉTODO DE APROXIMACIÓN LINEAL BASADO EN EL PRINCIPIO DE MÁXIMA ENTROPÍA.

En el presente trabajo el estudio del problema de la detección de impacto es resuelto como un problema de regresión lineal, dónde existe un vector de datos observados (2.27).

$$Y^j = \{y_1^j, y_2^j, \dots, y_m^j\} \quad (2.27)$$

Donde j corresponde al j –ésimo impacto a estudiar, y_m corresponde a los valores de la coordenada en \hat{x} , \hat{y} o la fuerza \hat{F} del impacto.

Los valores X^j representan un vector de características asociadas a Y^j , los valores x_m son el tiempo de llegada y la amplitud máxima de la señal del sensor.

$$X^j = \{x_1^j, x_2^j, \dots, x_m^j\} \quad (2.28)$$

Se busca estimar Y en base a un de un vector de características observadas de X , para lo cual se define una base de datos formada por parejas $(X^1, Y^1), (X^2, Y^2), \dots, (X^m, Y^m)$,

representándose X como una combinación lineal de los N vecinos X^j más cercanos en la base de datos (2.29) con un vector de ponderación ω con elementos w_j que cumple con la condición (2.30) [4].

$$X = \sum_{j=1}^N w_j X^j(X) \quad (2.29)$$

$$\sum_{j=1}^N w_j(X) = 1 \quad (2.30)$$

La ecuación (2.29) puede describirse de manera matricial, como se muestra en (2.31):

$$A \cdot \omega = b \quad (2.31)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^N \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \cdots & x_n^N \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{(n+1) \times N} \quad (2.32)$$

$$b = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \\ 1 \end{bmatrix}_{(n+1) \times 1} \quad (2.33)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (2.34)$$

Si se obtiene ω de (2.31), es posible estimar Y como se muestra en (2.35).

$$Y = \sum_{j=1}^N w_j Y^j(X) \quad (2.35)$$

Sin embargo este sistema de ecuaciones solo queda completamente definido si N es igual a $n + 1$, pero dado que N solo considera a los valores cercanos a la vecindad de X , suele ser menor, lo que resulta en sistema indeterminado. Para determinar los valores del vector ω , es que se recurre al principio de máxima entropía (PME). La entropía de la información o entropía de Shannon puede ser entendida como a la cantidad de incertidumbre que se recibe desde una señal cualquiera o como la cantidad de información que porta la señal, por lo tanto el PME propone que en una distribución de probabilidades

para cierta señal, la menos sesgada que se le pueda atribuir será aquella que dadas las condiciones del problema, posea la mayor entropía posible.

En términos matemáticos si se tiene una serie de n eventos discretos $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, dónde la posibilidad de cada evento es $p_a = p(x_a) \in [0,1]$, la incertidumbre asociada a cada p_a es $-\ln(p_a)$, entonces la entropía puede ser expresada como se ve en la ecuación (2.36).

$$H = - \sum_{a=1}^N p_a \cdot \ln(p_a) \quad (2.36)$$

Por lo tanto el principio de máxima entropía es el que asegura la ecuación (2.37) que se encuentra sujeta a las restricciones mostradas en (2.38) y (2.39) [4].

$$\max_{p \in R^+} \left[- \sum_{a=1}^N p_a \cdot \ln(p_a) \right] \quad (2.37)$$

$$\sum_{a=1}^N p_a = 1 \quad (2.38)$$

$$\sum_{a=1}^N p_a \cdot g_r(x_a) = E \quad (2.39)$$

Donde g_r corresponde a la función de densidad para p y E a la esperanza de la función de densidad g_r .

Sin embargo es posible aplicar al PME con una distribución de probabilidad previa, lo que permite reducir la incertidumbre con respecto a la probabilidad p_a , suponiendo que esta toma una distribución previa de m_a , esta se verá reducida a $-\ln(p_a/m_a)$, lo que modifica la expresión del PME de las ecuaciones (2.37) a (2.40):

$$\max_{p \in R^+} \left[- \sum_{a=1}^N p_a \cdot \ln(p_a/m_a) \right] \quad (2.40)$$

La expresión (2.40) cuenta con las mismas restricciones anteriores (2.38) y (2.39).

De esta manera es posible reemplazar p_a valores w_j de ω resultando la expresión (2.41), para lo cual deben cumplir las condiciones de (2.42) y (2.43), para resolver este problema se utiliza el método de los multiplicadores de Lagrange [4].

$$\max_{w \in R^+} \left[H(w) = - \sum_{j=1}^N w_j \cdot \log \left(\frac{w_j}{m_j} \right) \right] \quad (2.41)$$

$$\sum_{j=1}^N w_j = 1 \quad (2.42)$$

$$\sum_{j=1}^N w_j \cdot (X^j - X) = 0 \quad (2.43)$$

Para m_j se utiliza la distribución de Gauss (2.44) donde β_j (2.45) se compone de γ que corresponde a un parámetro que controla la curva de la aproximación Gaussiana y h_j a la distancia euclidiana entre los vecinos de la base de datos [4].

$$m_j(X) = \exp(-\beta_j \|X^j - X\|^2) \quad (2.44)$$

$$\beta_j = \frac{\gamma}{h_j^2} \quad (2.45)$$

Finalmente la forma que tendrán las matrices X e Y es la que se muestra en(2.46)y (2.47) respectivamente. Donde A_m^n es la amplitud máxima de la deformación del sensor m del $n - \text{ésimo}$ impacto, t_m^n el tiempo que transcurre entre el máximo global de la fuerza y un máximo (global o local) de la deformación del sensor m del $n - \text{ésimo}$ impacto, x_n la posición en la coordenada \hat{x} del $n - \text{ésimo}$ impacto, y_n la posición en la coordenada \hat{y} del $n - \text{ésimo}$ impacto y F_n es el máximo global de la señal de fuerza en $n - \text{ésimo}$ impacto.

$$X = \begin{bmatrix} A_1^1 & \cdots & A_1^n \\ t_1^1 & \cdots & t_1^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_4^1 & \cdots & A_4^n \\ t_4^1 & \cdots & t_4^n \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ y_1 & \cdots & y_n \\ F_1 & \cdots & F_n \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

2.5. MULTIPLICADORES DE LAGRANGE.

Para encontrar los w_j se utiliza el método de los multiplicadores de Lagrange, que permite encontrar mínimos o máximos de una función con una serie de restricciones. En

este caso la función a maximizar es (2.41) y las restricciones aplicadas corresponden a (2.48),(2.49) y (2.50) [5].

$$\sum_{j=1}^N w_j = 1 \quad (2.48)$$

$$\sum_{j=1}^N w_j X^j - X = 0 \quad (2.49)$$

$$\sum_{j=1}^N w_j Y^j - Y = 0 \quad (2.50)$$

Se define el Lagrangiano como se muestra en (2.51) donde $f(x)$ es la función objetivo y $g_k(x)$ representa las restricciones aplicadas. Para encontrar el mínimo se utiliza el gradiente de \mathcal{L} . En el caso particular de la ecuación (2.41), el termino lagrangiano corresponde a la expresión (2.53) con los multiplicadores correspondientes $\lambda_r (r = 0,1,2)$, y se aplica la derivada parcial con respecto a w_j [5].

$$\mathcal{L}(x, \lambda) = f(x) + \sum_{k=1}^M \lambda_k g_k(x) \quad (2.51)$$

$$\nabla[\mathcal{L}] = 0 \quad (2.52)$$

$$\delta \left[- \sum_{j=1}^N w_j \cdot \log \left(\frac{w_j}{m_j} \right) - \lambda_0 \left(1 - \sum_{j=1}^N w_j \right) + \lambda_1 \left(X - \sum_{j=1}^N w_j X^j \right) + \lambda_2 \left(Y - \sum_{j=1}^N w_j Y^j = 0 \right) \right] = 0 \quad (2.53)$$

El resultado de (2.53) es la expresión(2.54). Se asume que $\lambda_0 = \log(Z) - 1$. Donde Z corresponde a la función de partición. De este modo la ecuación puede ser descrita como (2.55). Finalmente se obtiene una expresión para w_j en (2.56) [5].

$$-1 - \log \left(\frac{w_j}{m_j} \right) - \lambda_0 - \lambda_1 X^j - \lambda_2 Y^j = 0 \quad (2.54)$$

$$\log \left(\frac{w_j}{m_j} \right) + \lambda_0 = -\lambda_1 X^j - \lambda_2 Y^j \quad (2.55)$$

$$w_j = \frac{e^{-\lambda_1 X^j - \lambda_2 Y^j}}{Z} \quad (2.56)$$

Si a (2.56) se aplica la restricción de $\sum_{j=1}^N w_j = 1$ (2.48) se obtiene la definición de $\sum_{j=1}^N Z_j$ (2.57) que permite reescribir w_j (2.56) como una función de peso (2.58) [5].

$$\sum_{j=1}^N Z_j = \sum_{j=1}^N e^{-\lambda_1 X^j - \lambda_2 Y^j} \quad (2.57)$$

$$w_j = \frac{Z_j}{\sum_{j=1}^N e^{-\lambda_1 X^j - \lambda_2 Y^j}} = \frac{Z_j}{\sum_{j=1}^N Z_j} \quad (2.58)$$

El término w_j como se muestra en (2.58) se puede reemplazar en las restricciones (2.49) y (2.50) para obtener un sistema de ecuaciones no lineales -(2.59) y (2.60)- para obtener los parámetros λ_1 y λ_2 . Este tipo de sistema se resuelve mediante un método iterativo [5].

$$\sum_{j=1}^N e^{-\lambda_1 X^j - \lambda_2 Y^j} X^j - X = 0 \quad (2.59)$$

$$\sum_{j=1}^N e^{-\lambda_1 X^j - \lambda_2 Y^j} Y^j - Y = 0 \quad (2.60)$$

2.6. EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE IMPACTOS.

Para comparar el desempeño del PME entre distintas bases de datos o con otros métodos de detección de impactos, se requiere determinar el error al estimar la fuerza y la posición de los impactos.

Se definen los parámetros de error espacial para las coordenadas x e y -(2.61) y (2.62) – como el promedio de la diferencia entre las dimensiones correspondientes a los vectores Y estimado y el real normalizado por el tamaño en la coordenada correspondiente, de esta manera, con la multiplicación de ambos se obtiene el error de área (2.63) [1].

$$E_x = \frac{\sum_{k=1}^N |x_k^R - x_k^E|}{N \cdot d_x} \quad (2.61)$$

$$E_y = \frac{\sum_{k=1}^N |y_k^R - y_k^E|}{N \cdot d_y} \quad (2.62)$$

$$E_A = E_x * E_y = \frac{\sum_{k=1}^N |y_k^R - y_k^E| \cdot |x_k^R - x_k^E|}{N^2 \cdot A} \quad (2.63)$$

Donde:

- E_x : Error promedio en la coordenada x .
- E_y : Error promedio en la coordenada y .
- E_A : Error promedio de área.
- N : Número de impactos utilizados en la prueba.
- x_k^T : Posición en x del k – ésimo impacto; T indica si corresponde a la posición real (R) o estimada (E).
- y_k^T : Posición en y del k – ésimo impacto; T indica si corresponde a la posición real (R) o estimada (E).
- d_x : Tamaño de la placa utilizada en la coordenada x .
- d_y : Tamaño de la placa utilizada en la coordenada y .

Para la fuerza se realiza un procedimiento análogo al recién propuesto, utilizando la diferencia entre el valor real y el valor estimado, pero en este caso se divide por la fuerza real como se muestra en (2.64) [1].

$$E_F = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{F_k^R - F_k^E}{F_k^R} \right| \quad (2.64)$$

Dónde:

- E_F : Error promedio de la fuerza del impacto.
- N : Número de impactos utilizados en la prueba.
- F_k^T : Fuerza (F) del impacto del k – ésimo impacto; T indica si corresponde a la posición real (R) o estimada (E).

También es necesario comparar el método del PME con otros algoritmos de la literatura, que no necesariamente utilizasen en su aplicación una disposición experimental similar la del presente trabajo, por ello se utiliza el parámetro de eficiencia de precisión (2.65) propuesto por Xu [1].

$$\eta = \frac{1 - E_A}{N_s N_D} \quad (2.65)$$

Donde:

η : Eficiencia de precisión.

E_A : Error de Área (2.63).

N_s : Número de sensores.

N_D : Número de datos de impacto.

La eficiencia de precisión, permite relacionar el número de datos usados, el número de sensores, el área de la placa y el error espacial obtenido, de manera que mientras menos datos de entrada se utilice o sensores se utilice, mejor eficiencia tendrá el métodos.

3. METODOLOGÍA.

3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.

Basándose en el estudio de los antecedentes teóricos y el estado del arte del problema de la detección de impactos se determina la disposición y elementos necesarios para un banco de pruebas donde se puedan realizar los experimentos y se construye de acuerdo a lo determinado. En este trabajo el banco de pruebas fue construido en el Laboratorio de Vibraciones del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile, ubicado en Beaucheff 851; los materiales y herramientas necesarias para la construcción y la utilización del banco de pruebas fueron obtenidos por medio del mismo laboratorio. El detalle del montaje experimental utilizado para el presente trabajo se encuentra en el Capítulo 4.

3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS PARA LA BASE DE DATOS Y SET DE PRUEBAS.

La construcción del montaje experimental nos permite recabar y digitalizar la información requerida de impactos reales de una placa plana, las series experimentales serán divididas en los siguientes grupos:

- Serie de para la base de datos: Consiste en una serie de impactos realizados en posiciones determinadas para abarcar de manera ordenada la placa, estos impactos se utilizaran para construir la base de datos con las que se construye linealmente los impactos de prueba, utilizando el método de máxima entropía, proceso que se encuentra explicado en la Sección 2.4.
- Serie para set de pruebas: Esta serie de impactos se realiza en posiciones aleatorias, los datos recabados se utilizan en para comprobar la efectividad del método utilizado.

La disposición experimental propuesta permite almacenar las señales de respuesta a los impactos en archivos de texto (".TXT").Posteriormente, utilizando un computador con el entorno de desarrollo integrado de software matemático MATLAB R2014a de MATHWORKS, se realiza el procesamiento de señal que permite obtener las señales analíticas de la fuerza del impacto en el tiempo y de la deformación en el tiempo para cada impacto, almacenándose la información en archivos del tipo "MATRIX ACCESS TABLE" que presentan mayor facilidad de acceso para los etapas posteriores.

El procesamiento de señal realizado en esta etapa se encuentra descrito próximo capítulo.

3.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS BASES DE DATOS, SET DE VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MÁXIMA ENTROPÍA.

Una vez que se han realizado los experimentos de mencionados en la sección anterior y se cuenta con los archivos de las señales analíticas para cada impacto se procede a construir las bases de datos y set de pruebas que se utilizarán para aplicar y evaluar el desempeño del principio de máxima entropía en la detección de impactos en placas planas. Para ello se desarrollan una serie de programas en MATLAB cuyo fin es filtrar la información de las señales para obtener matrices con la forma especificada en las ecuaciones (2.46) y (2.47). Los programas desarrollados con ese fin se encuentra en el Anexo B Códigos de Importancia y corresponden a: B.1 Función: Tabular Carpetas, B.2 Función: Filtrar Señales B.3 Función: Normalizar Fuerzas y B.4 Función: Ponderar Tiempos.

A continuación se procede a aplicar el método de máxima entropía para detectar la localización y e intensidad de los impactos de prueba, este proceso requiere de la utilización del paquete de software de código abierto “LIME base” para MATLAB desarrollado por el profesor Alejandro Ortiz Bernardin del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, este cuenta con algoritmos que permiten utilizar el principio de máxima entropía dentro del entorno MATLAB. En el Anexo B.6 Evualar Bases se encuentra el programa que se vale de las funciones de “LIME base” para aplicar y evaluar el desempeño del método en el presente trabajo, mientras que en el Capítulo 5 se encuentran los resultados de esta fase.

Esta parte del trabajo es de carácter iterativo, puesto que una vez que se evalúa el desempeño de una base de datos, se obtiene información que permite introducir cambios en la misma con el fin mejorarla o crear una nueva base con un mejor desempeño. Este proceso se realiza sobre las señales digitalizadas, sin que se requiera volver a la fase experimental.

3.4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

En la etapa final del trabajo con los resultados obtenidos al resolver el problema de la detección de impactos con el método de máxima entropía, se comentan para explicar la relevancia que obtuvieron el desarrollo del estudio, como estos cumplen o no con los objetivos propuestos.

Además se comparan con otros trabajos de la literatura y se comentan que ventajas y desventajas plantea la metodología usada en contraste con resto.

Finalmente se concluye recapitulando el trabajo y englobándolo en función de los objetivos planteados inicialmente.

4. MONTAJE EXPERIMENTAL.

El montaje experimental tiene objetivo como construir un banco de pruebas para realizar experimentos de respuestas vibratorias a impactos en placas planas, de los que se pueda obtener un archivo digitalizado y de fácil utilización en MATLAB de las señales analíticas.

Para el presente trabajo se opta por construir un banco de pruebas lo más similar posible al utilizado en [1]. Se opta por esta disposición experimental puesto que se realiza con herramientas que se encuentran disponibles también en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas del Departamento de Ingeniería Mecánica, utiliza sensores de bajo costo, lo que permite reproducirse fácilmente y porque posee utiliza una baja cantidad de estos sensores en relación al área de la placa utilizada, por lo que el énfasis del trabajo se centra en el algoritmo de detección de impactos.

La disposición experimental que se utiliza para el banco de pruebas es la que se muestra en la Figura 4.1 y consiste en:

- Una placa plana de aleación de Aluminio AL6061, de dimensiones de 490mm x 390 mm x 2,5 mm fijada a una tabla mediante 4 pernos.
- 4 discos piezoeléctricos adheridos a la placa en las siguientes posiciones (170 mm, 290 mm), (320 mm, 290 mm), (320 mm, 100 mm) y (170 mm, 100 mm).
- Un martillo de impacto de impacto con un sensor de fuerzas.
- Una tarjeta de adquisición de al menos 5 canales.
- Computador personal con software de adquisición de Datos y MATLAB.

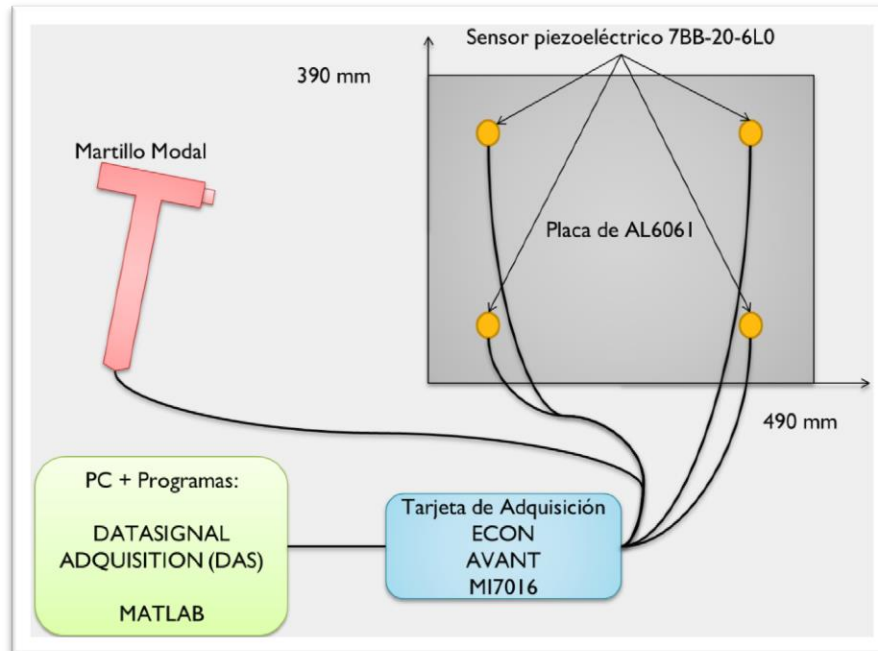


Figura 4.1 Esquema de disposición experimental.

La placa de utilizada corresponde a una placa de aluminio AL6061, material que posee las características que aparecen en la Tabla 4.1. El material y el espesor de la placa evitan que esta sufra daños que alteren sus propiedades en el transcurso de los experimentos.

Tabla 4.1 Propiedades del Aluminio AL6061.

Características	Valor	Unidad
Composición	98,5 % Al; 0,04% Cr; 0,15% Cu.	-
Dureza	30	[HB]
Módulo de elasticidad	68.9	[GPa]

FUENTE: [6].

Los sensores piezoeléctricos escogidos destacan por ser muy livianos, lo que evita que alteren drásticamente la frecuencia natural o que induzcan deformaciones considerables al colocarse sobre elementos estructurales, fáciles de manipular y de muy bajo costo, estos sensores pueden ser adheridos fácilmente a una placa plana utilizando adhesivos instantáneos comerciales sin verse afectado notoriamente su desempeño. En la Tabla 4.2 se muestran las características de los sensores utilizados, la variación de voltaje que producen el piezoeléctrico se registra y digitaliza con la tarjeta de adquisición.

Tabla 4.2 Características del sensor piezoeléctrico 7BB-20-6L0.

Características	Valor	Unidad
Frecuencia de resonancia	63 ±0,6	[kHz]
Diámetro placa	20	[mm]
Diámetro piezoeléctrico	14	[mm]

Espesor placa	0,2	[mm]
Espesor total	0,42	[mm]

FUENTE: [7]

Se utiliza un martillo modal que permite excitar la estructura mediante un impulso y medir la fuerza que este aplica a lo largo del tiempo, esta señal, al igual que en el caso de los sensores es enviada a la tarjeta de adquisición. En la Tabla 4.3 se encuentran las características del modelo utilizado.

Tabla 4.3 Características del martillo modal.

Característica	Valor	Unidades
Tipo de transductor	Fuerza	-
Sensibilidad	4	[pC/N]
Rango de medición	±444	[N]
Masa	0,1	[kg]
Material punta	Acero	-

FUENTE: [8].

La tarjeta de adquisición tiene como función digitalizar las señales obtenidas por el martillo modal y los sensores piezoeléctricos, este dispositivo se conecta a un PC que cuente con el software de control de la tarjeta, DATA SIGNAL ACQUISITION (DAS) desarrollado por ECON-GROUP, donde se puede ajustar la sensibilidad de las señales, la frecuencia de muestreo o la duración de las ventanas rectangulares. El software se encarga de guardar un archivo en formato “.TXT”. Las mediciones se realizaron a una frecuencia de muestreo de 24.000 Hz.

Tabla 4.4 Características ECON-MI7016 tarjeta de adquisición usada.

Característica	Valor	Unidad
N° de canales	16	-
Resolución	24-bit	-
Voltaje	±10	[VPEAK]
Precisión de frecuencia	0.0075	[%]

FUENTE: [9].

Dado que se cuenta con el paquete LIME Base para MATLAB, es conveniente traspasar la información a un formato con un mejor acceso desde ese entorno. Por lo que se programa una serie de utilidades para MATLAB que se encargan del procesamiento de señales, aplicándose la Transformada de Hilbert de la Sección 2.3.2 en su versión nativa de MATLAB para obtener la envolvente, información que es traspasada y ordenada para ser guardada en el formato de “MICROSOFT ACCESS TABLE”.

Para la construcción de la base de datos se realizan 117 impactos que abarcan de manera homogénea el área circunscrita entre los pernos de anclaje, en la Figura 2.1 se observa la distribución de estos impactos los cuales aparecen representados mediante círculos azules mientras que el rectángulo rojo corresponde a la placa. Las posiciones de los

sensores aparecen representadas mediante círculos rojos. Las posiciones exactas de los impactos se encuentran en el Anexo A.1.

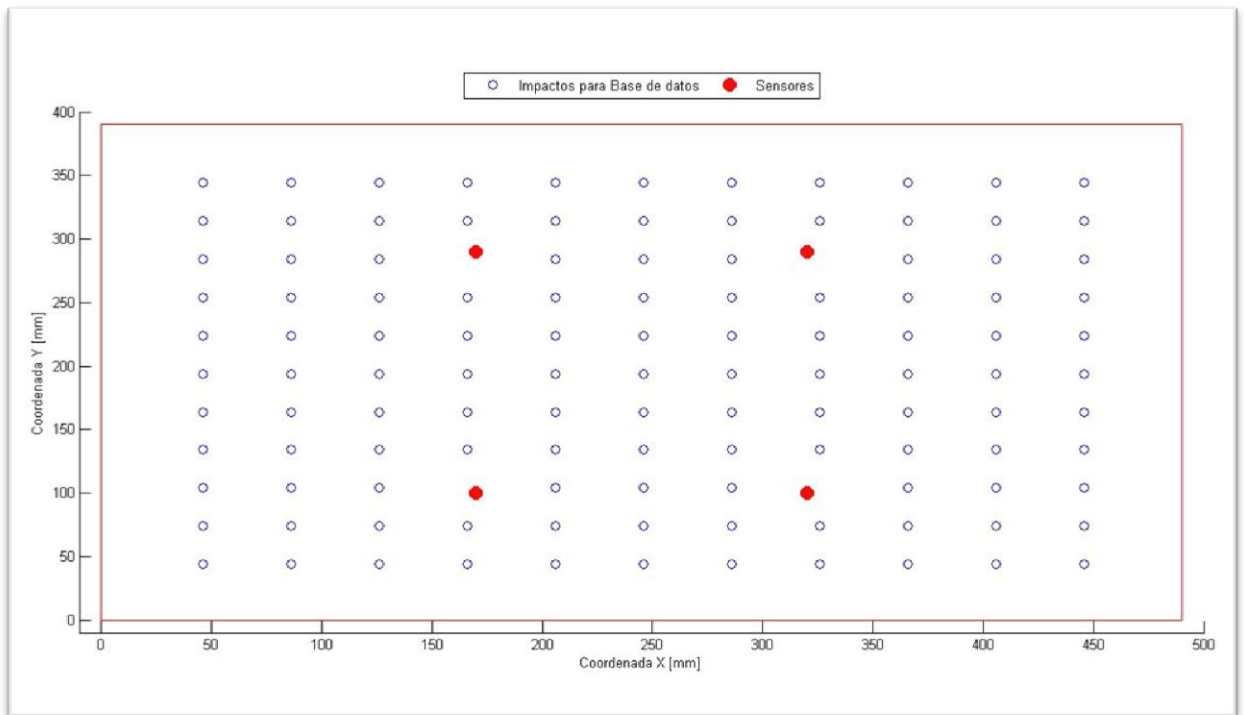


Figura 4.2 Posición de los impactos en la placa para la base de datos.

En el caso del set de prueba se realizan 60 impactos distribuidos aleatoriamente en la placa, la posición de estos se muestran en la Figura 2.1, el detalle de las posiciones se encuentra en el Anexo A.2.

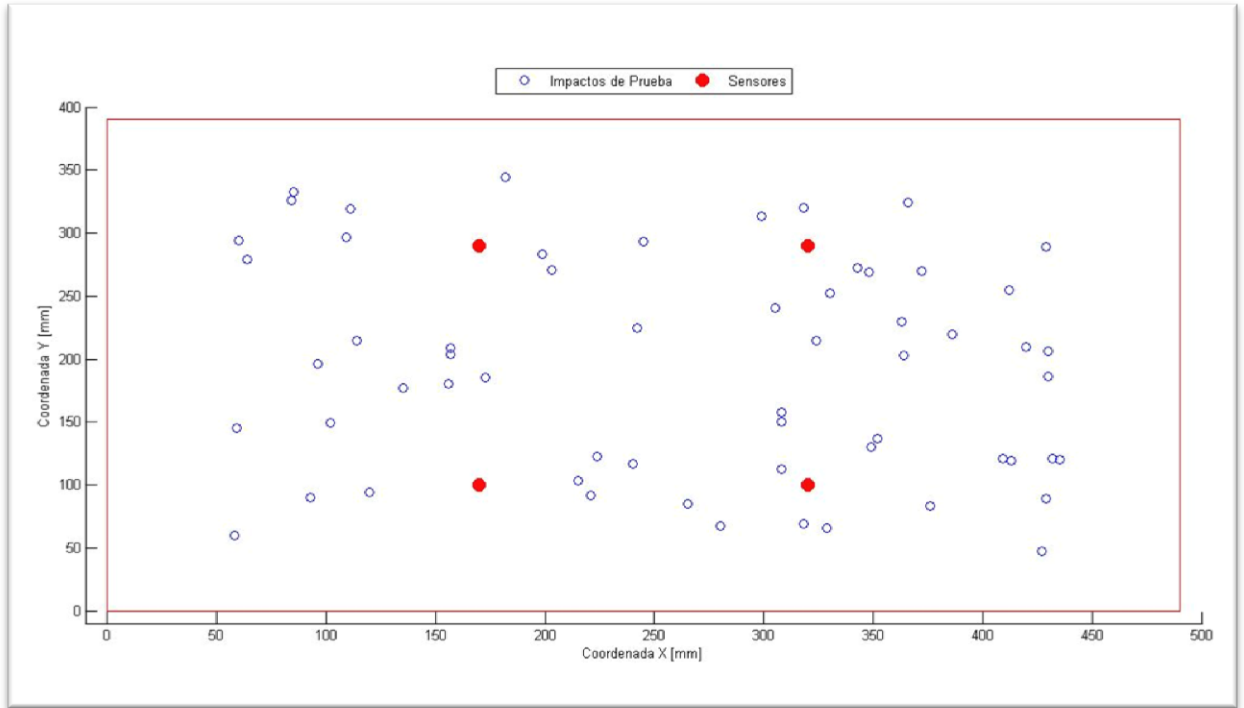


Figura 4.3 Posición de los impactos en la placa para el set de pruebas

5. APLICACIÓN DE LA APROXIMACIÓN LINEAL MEDIANTE EL PRINCIPIO DE MÁXIMA ENTROPÍA.

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos al resolver el problema de la detección de impactos usando el PME, como se menciona en la sección 3.3 este es un proceso iterativo, por lo que tras cada aplicación se modifica la base de datos para con obtener mejores resultados.

Las distintas bases de datos utilizadas se pueden caracterizar por:

- Forma de la matriz: Consisten en alterar los valores que se presentan en las matrices X e Y de las expresiones (2.46) (2.47). Las modificaciones propuestas a la base sin alteraciones (BSA) son la normalización de amplitudes máximas (BIN) y la ponderación de los tiempos de llegada (BINTP).
- Tipo de búsqueda máximos: Al momento de elegir el máximo de la señales estudiadas se puede considerar tanto el máximo global (MAX) como un máximo local que cumpla con un requisito de mínimo de amplitud (FPP).

Para la evaluación de la base de datos se utiliza el programa que aparece en el Anexo B.5 Evaluar Base Vecinos, el cual fija el número de vecinos y utiliza la función GAMMANB para calcular el parámetro gamma óptimo de la función gamma dada en la ecuación (2.45) que controla el número de vecinos y el peso que aporta cada vector en la vecindad al valor estimado. En la sección 5.1 se analiza el efecto que posee en el número de vecinos en el desempeño del método.

5.1. NÚMERO DE VECINOS, GAMMA Y DESEMPEÑO DE LA BASE.

El parámetro γ de la expresión (2.45) controla la influencia que poseen los elementos de la base al realizar la estimación del valor Y en (2.35), un gamma alto significa que $\|X^j - X\|$ tiene poca influencia, los elementos de la base que se encuentran a mayor distancia euclidiana aportan cada vez menos, lo que termina en una reducción del número de vecinos. Como se cuenta con el programa GAMMANB que permite calcular γ dado el número de vecinos, se construye un programa que muestra como es la variación del parámetro γ , del promedio de error de la fuerza y del área a medida que se toma un número cada vez mayor de vecinos. Este programa se encuentra en el Anexo B.5 Evaluar Base Vecinos.

Para apreciar el efecto de la variación del número de vecinos se utiliza una base tipo BSA-MAX, por ser considerada la más simple de todas. Se analiza hasta un número de 50 vecinos, considerando que el tamaño total de la base es de 117 elementos. Los resultados obtenidos para los porcentajes de error -2.63 y 2.64 respectivamente se muestran en la Figura 5.1 y en la Figura 5.2 para el factor Gamma (2.45)

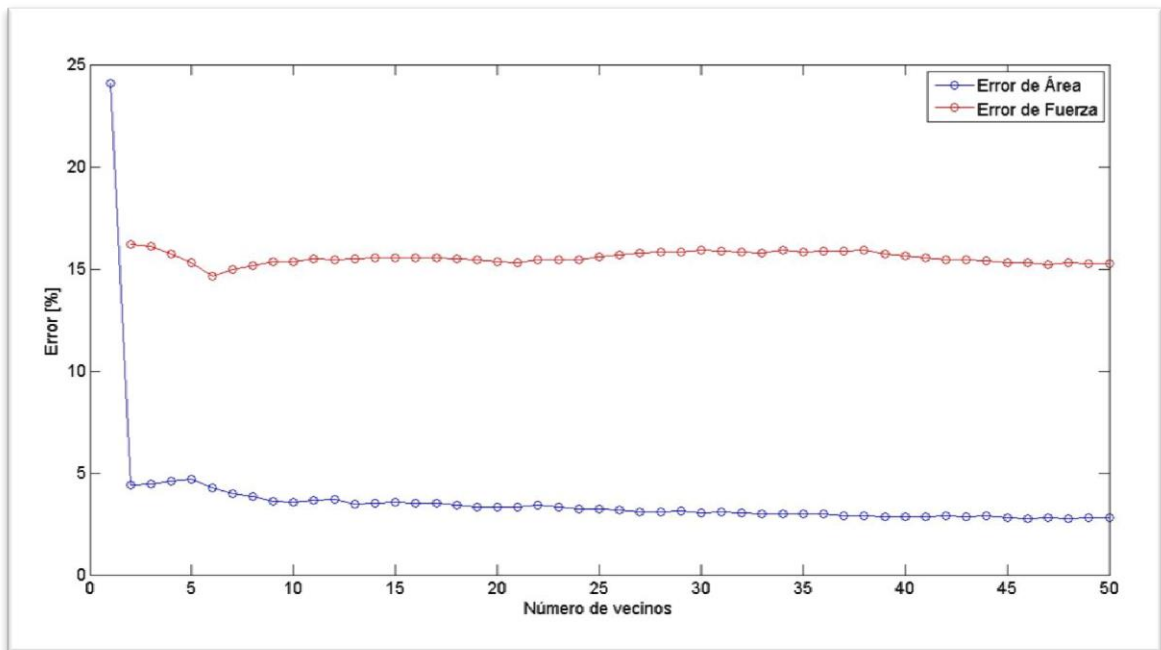


Figura 5.1 Variación de los porcentajes de error de área y fuerza según el número de vecinos (BSA-MAX).

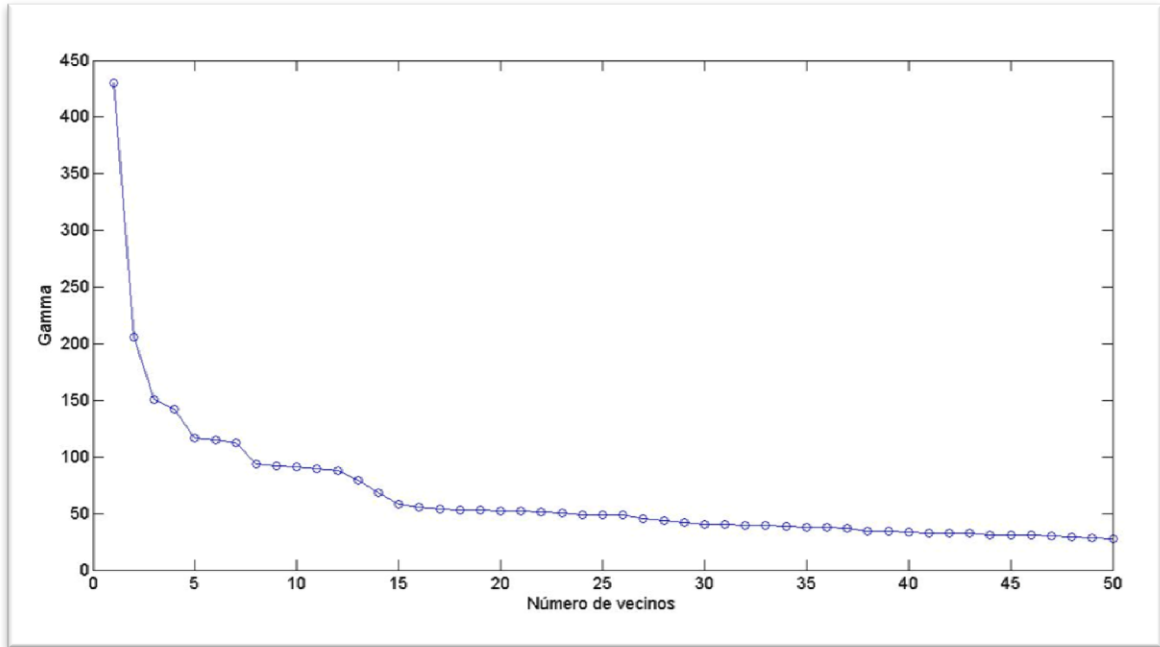


Figura 5.2 Variación de Gamma según el número de vecinos (BSA-MAX).

5.2. BASE SIN ALTERACIONES-MAX (BSA-MAX).

En primer lugar se realiza el proceso de obtención de los máximos globales de las señales analíticas y la diferencia de tiempo que existe entre la ocurrencia del máximo de la señal de la fuerza y el máximo de la señal de deformación, con estos datos se construyen las matrices de la forma mencionada en la sección 2.4. La función que se ocupa para buscar los máximos globales es la función MAX de MATLAB. En el Anexo B.6 se muestran los programas que se utilizan para este fin. La Tabla 5.1 muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 5.1 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BSA-MAX.

Característica	Valor	Unidad
Error promedio coordenada x.	19.11	[%]
Error promedio coordenada y.	18.32	[%]
Error promedio de área.	3.50	[%]
Error promedio de la fuerza F	15.53	[%]

Los valores estimados para cada impacto en la coordenada x se pueden observar en la Figura 5.3 como una línea negra continua mientras que los valores reales aparecen como una línea discontinua roja, el mismo tipo de gráfico se utiliza para los valores estimados y reales en la coordenada y en Figura 5.5 y para la fuerza de impacto en la Figura 5.7.

Se presenta un histograma del error de la estimación de x , calculado utilizando (2.61), en la Figura 5.4, el histograma del error en y (2.62) corresponde a la Figura 5.6, y para el error de la fuerza de impacto (2.64) se obtiene el histograma de la Figura 5.8.

En la Figura 5.9 es posible ver una comparación espacial entre la posición real del impacto y la posición estimada; los círculos indican la posición real del impacto y las cruces el estimado mediante el PME, cada par se encuentra unido por una línea que permite apreciar el error obtenido en cada impacto.

La matriz del tipo BSA se considera el caso base del PME, a causa de la mínima alteración que se realiza sobre los datos experimentales, todas las bases de datos posteriores se crean a partir de manipulación matemática de esta. Así mismo el tipo de búsqueda MAX es considerado el método más simple, puesto que entrega únicamente el máximo global.

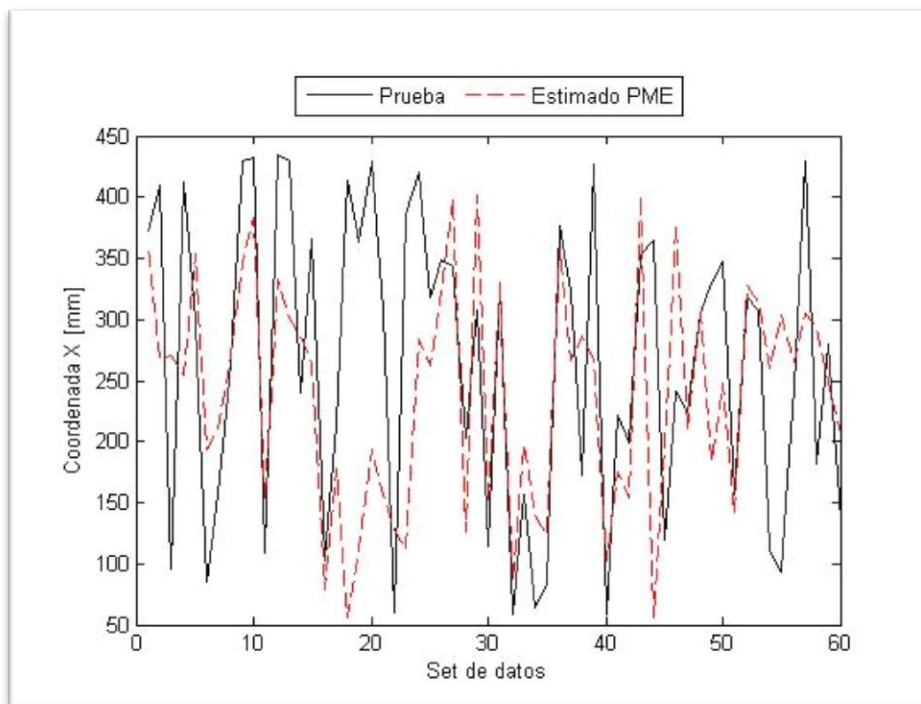


Figura 5.3 Coordenada X experimental y estimada con BSA-MAX.

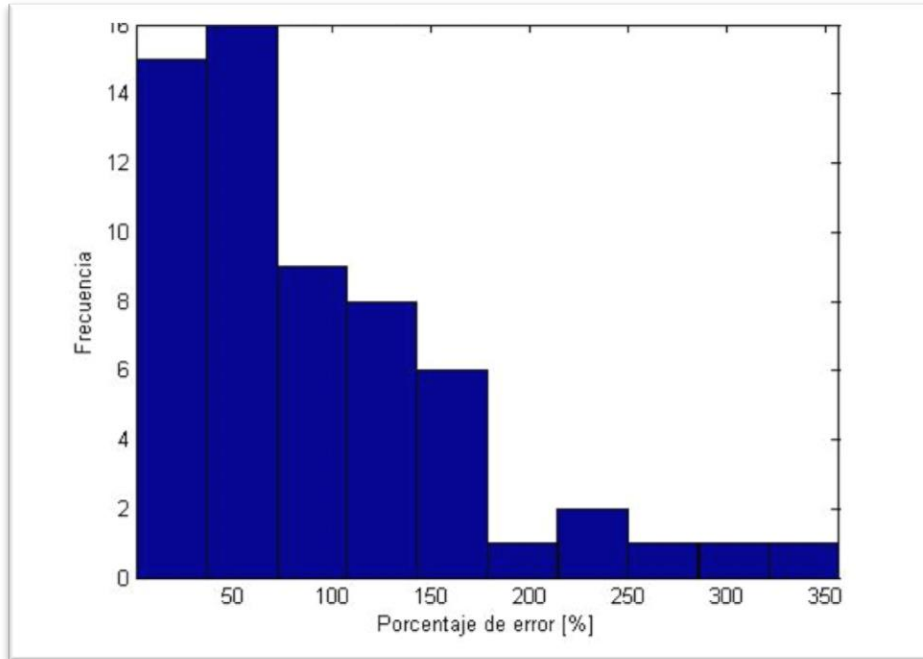


Figura 5.4 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BSA-MAX.

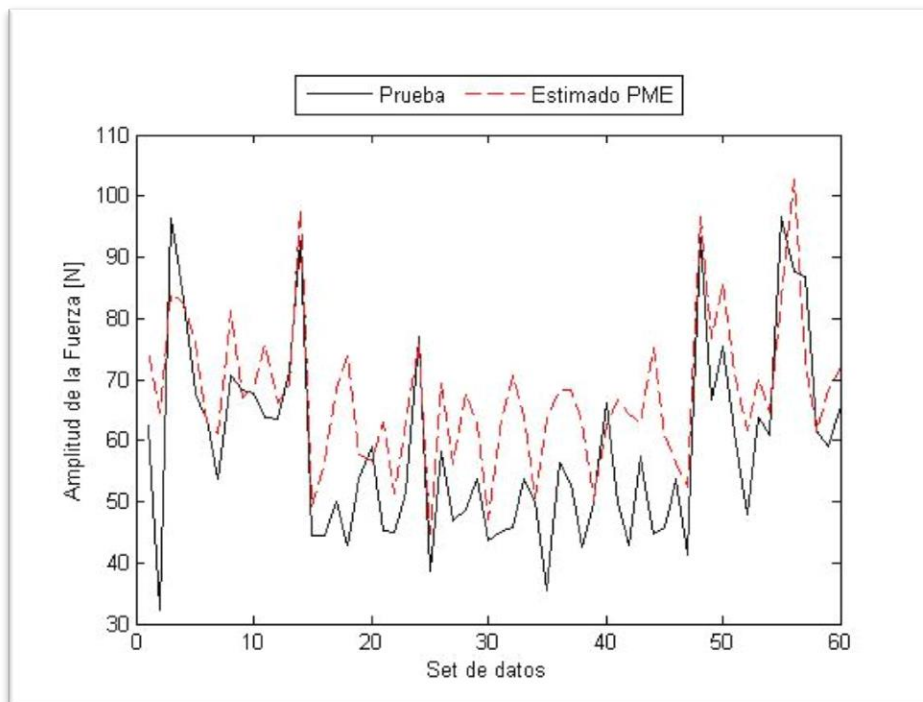


Figura 5.5 Coordenada Y experimental y estimada con BSA-MAX.

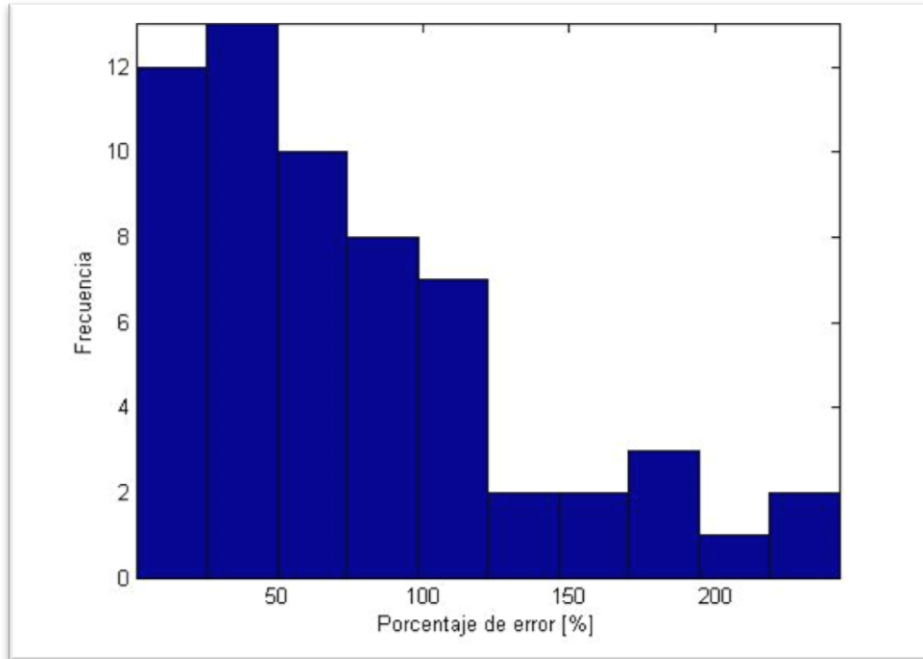


Figura 5.6 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BSA-MAX.

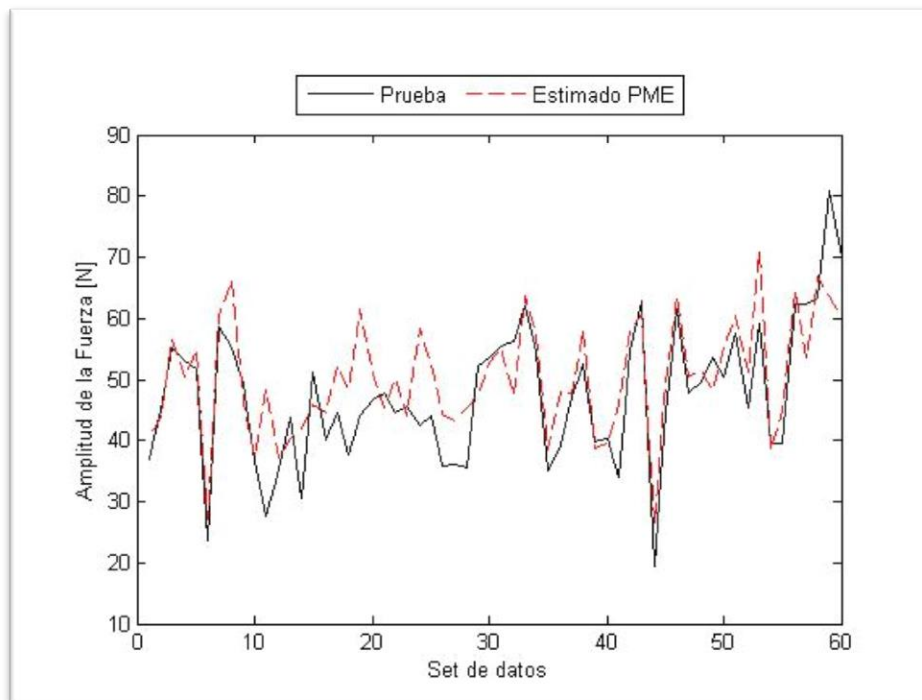


Figura 5.7 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BSA-MAX.

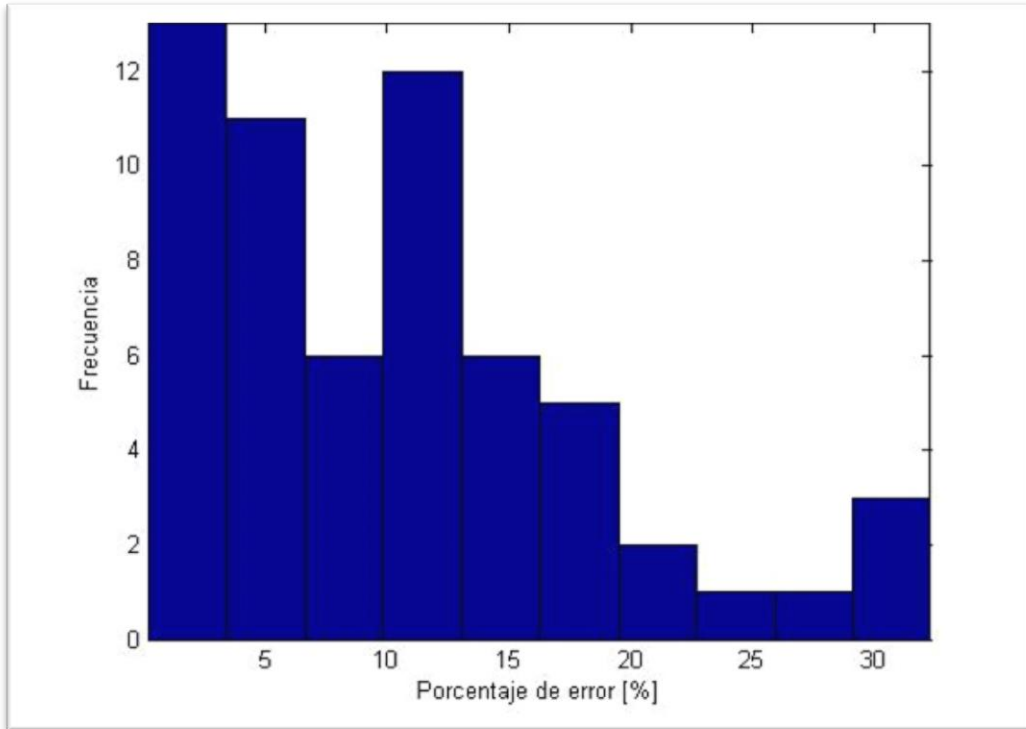


Figura 5.8 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BSA-MAX.

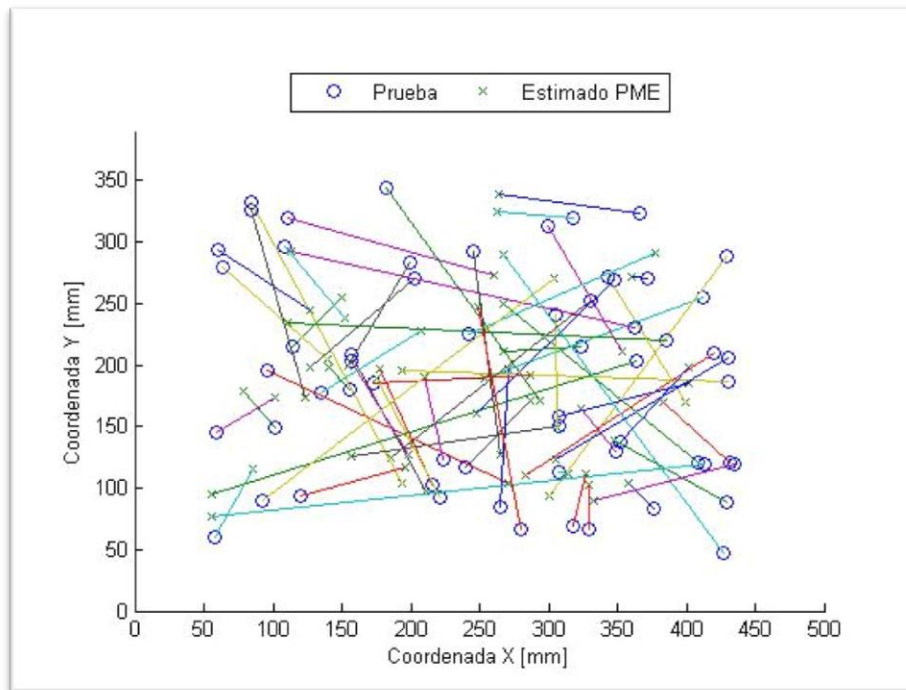


Figura 5.9 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BSA-MAX.

5.3. BASE CON AMPLITUDES NORMALIZADAS – MAX (BIN-MAX).

La primera alteración realizada a la matriz es la normalización de las amplitudes máximas, si se considera que la BSA tiene la forma mostrada en (2.46) y (2.47), la normalización consiste en dividir las amplitudes máximas de la señales de deformación por del impacto correspondiente, para luego multiplicarlas por un factor, como se muestra en la expresión (5.1) y reemplazar el valor de fuerza por el mismo factor (5.2). Dada la linealidad del sistema , la matriz X resultante equivale a haber medido la respuesta a una fuerza α .

$$X = \begin{bmatrix} \alpha A_1^1/F_1 & \cdots & \alpha A_1^n/F_n \\ t_1^1 & \cdots & t_1^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_4^1/F_1 & \cdots & A_4^n/F_n \\ t_4^1 & \cdots & t_4^n \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ y_1 & \cdots & y_n \\ \alpha & \cdots & \alpha \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Donde:

A_j^i : Amplitud máxima obtenida en i – ésimo sensor para el j – ésimo impacto.

F_n : Fuerza j – ésimo impacto.

α : Magnitud de la fuerza normalizada.

El procedimiento puede realizarse para cualquier α mayor que 0, y es posible anexar las matrices con distinto α horizontalmente para obtener una base de datos mucho más completa. En este caso en particular se utilizaron $\alpha = (0.1 , 1 , 50 , 100 , 150 , 200 , 250)$ todas estas matrices se concatenaron horizontalmente a la matriz original. El programa utilizado puede con este propósito puede verse en el Anexo B.3 Función: Normalizar Fuerzas.

En la Tabla 5.2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, mientras que en la Figura 5.10 ve la comparación entre el estimado y real para la coordenada x y en la Figura 5.11 se tiene el histograma correspondiente, para la coordenada y la comparación se encuentra en la Figura 5.12 y el histograma en la Figura 5.13, en el caso de la fuerza la Figura 5.14 muestra la comparación y la Figura 5.15 el histograma; finalmente la Figura 5.16 muestra la diferencia entre los valores reales y estimados de posición en la placa.

Tabla 5.2 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BIN-MAX.

Característica	Valor	Unidad
Error promedio coordenada x.	16.37	[%]
Error promedio coordenada y.	18.97	[%]
Error promedio de área.	3.11	[%]
Error promedio de la fuerza F	13.61%	[%]

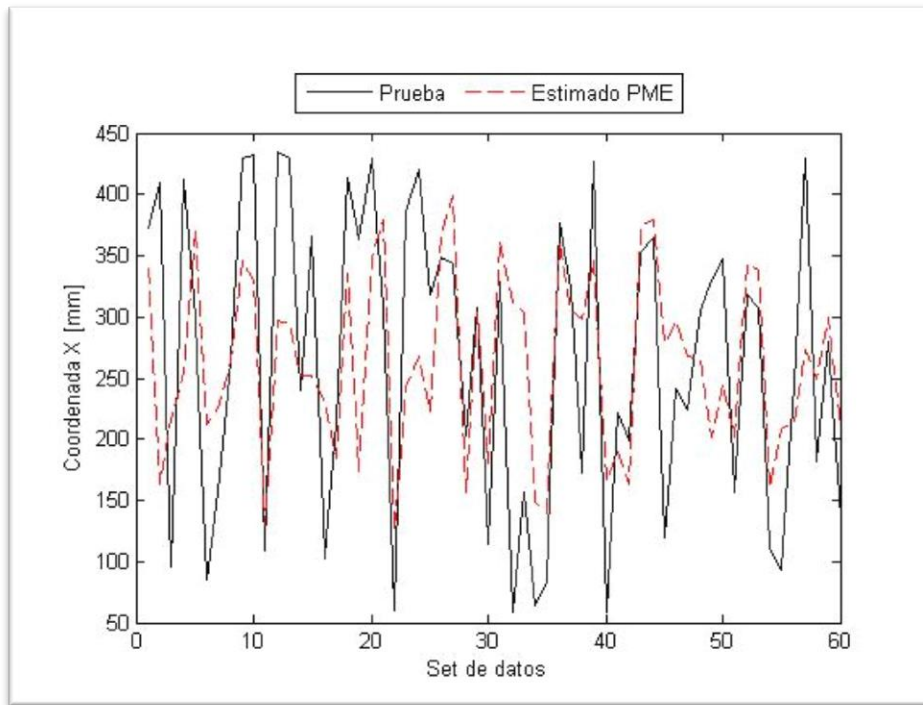


Figura 5.10 Coordenada X experimental y estimada con BIN-MAX.

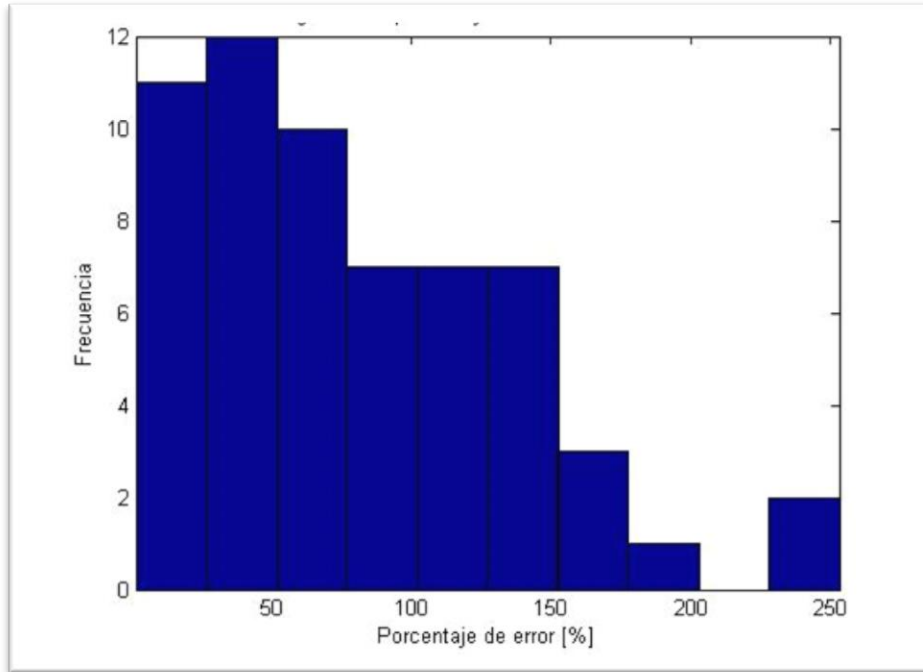


Figura 5.11 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BIN-MAX.

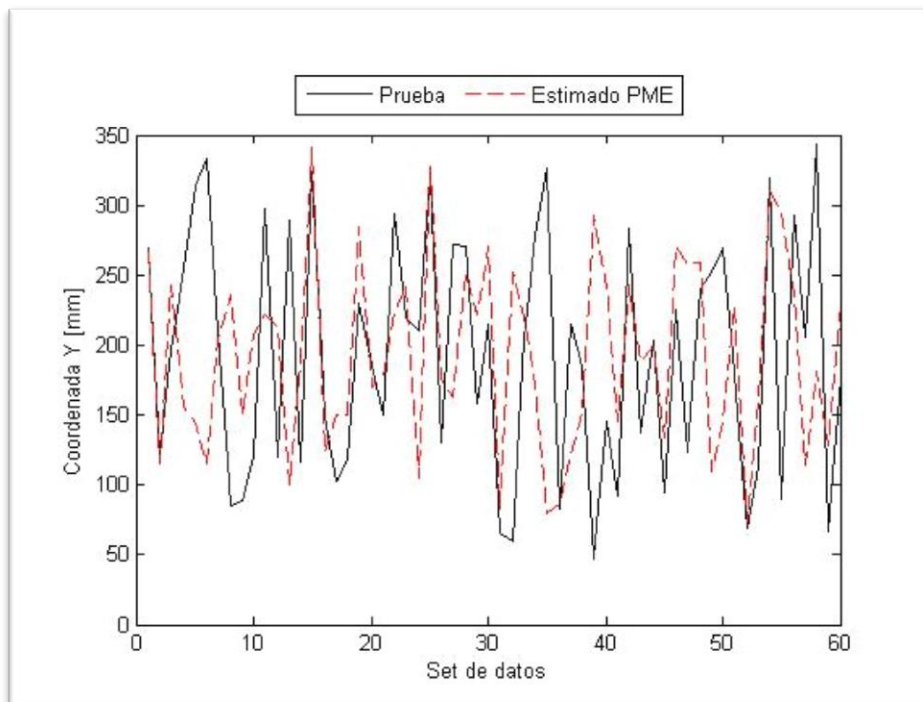


Figura 5.12 Coordenada Y experimental y estimada con BIN-MAX.

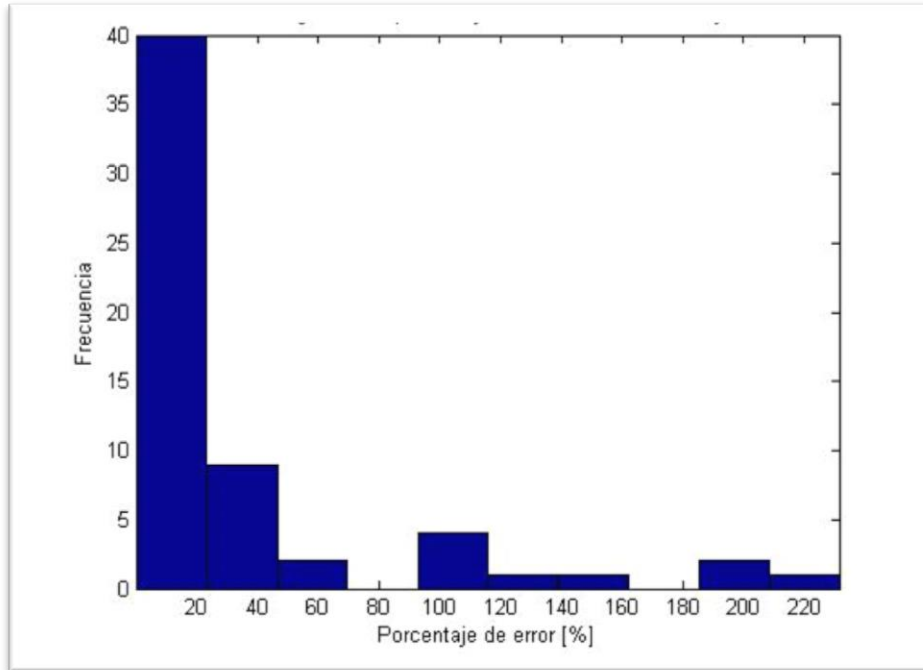


Figura 5.13 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BIN-MAX.

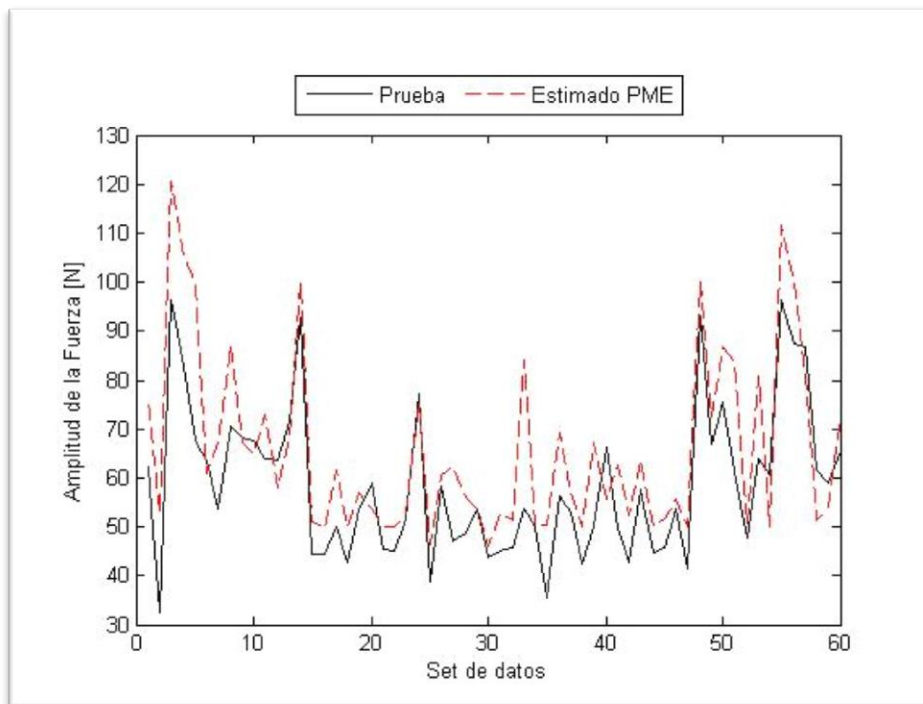


Figura 5.14 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BIN-MAX.

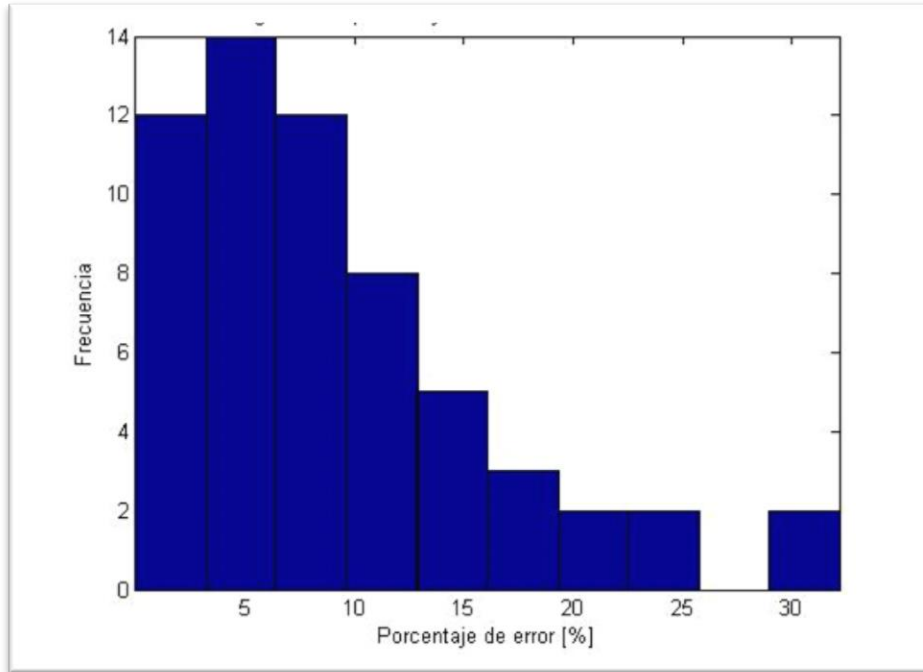


Figura 5.15 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BIN-MAX.

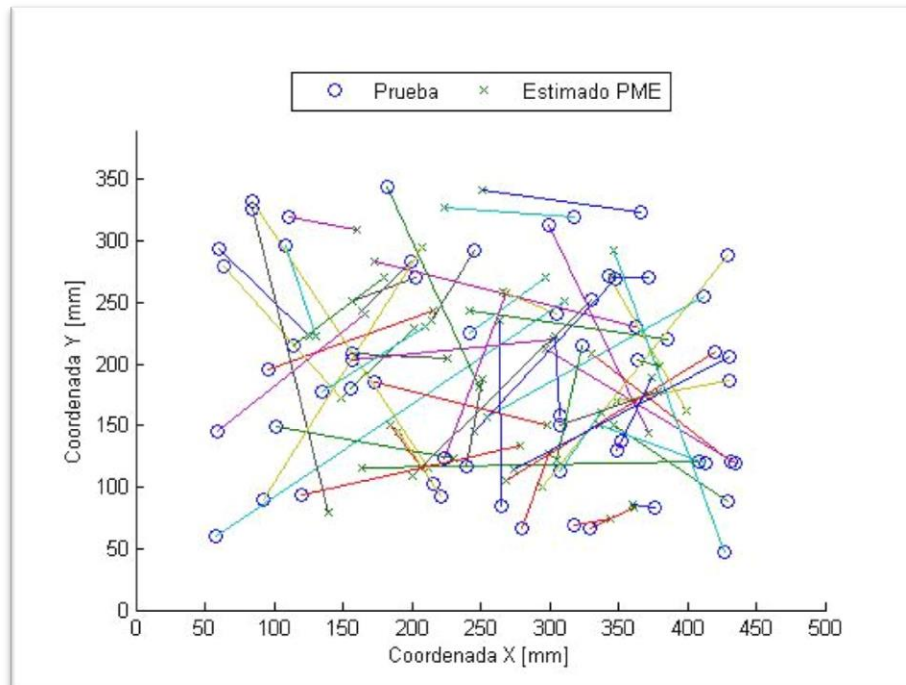


Figura 5.16 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BIN-MAX.

5.4. BASE CON AMPLITUDES NORMALIZADAS Y TIEMPO PONDERADOS – MAX (BINTP-MAX).

El último tipo de modificaciones a las matrices realizadas consiste en multiplicar por un factor β los tiempos de llegada de la matriz, esto a causa de que existe una diferencia de varios ordenes de magnitud entre ambos el parámetro de tiempo y el parámetro de amplitud. Esta modificación se realiza sobre una matriz con forma BIN por lo que la base BINTP tiene la forma que aparece en (5.3) para X y (5.4) para Y .

$$X = \begin{bmatrix} \alpha A_1^1/F_1 & \cdots & \alpha A_1^n/F_n \\ \beta t_1^1 & \cdots & \beta t_1^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_1^4/F_1 & \cdots & \alpha A_1^n/F_n \\ t_1^4 & \cdots & t_1^n \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ y_1 & \cdots & y_n \\ \alpha & \cdots & \alpha \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Para el caso particular se escoge un $\beta = 100000$ que permite que las amplitudes y los tiempos sean comparables. Cabe destacar que en este caso no es necesario ajustar las posiciones, por lo que Y queda intacto, sin embargo se debe ser coherente y aplicarse este mismo factor la matriz de prueba que se utiliza en la aplicación del PME. Los programas que se utilizan en MATLAB para construir este tipo de matrices se encuentran en el Anexo B.4 Función Ponderar Tiempos.

Los resultados obtenidos al utilizar BINTP-MAX están en resumidos en la Tabla 5.3, las comparaciones entre lo estimado y el valor real para x se encuentran en Figura 5.17, para y en la Figura 5.19 y para la fuerza F en la Figura 5.21. El histograma para x (Figura 5.18), para y (Figura 5.20) y para la fuerza F (Figura 5.22) permiten obtener más detalles de su desempeño. En la Figura 5.23 se puede encontrar una comparación entre la localización real de los impactos y la estimada.

Tabla 5.3 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BINTP-MAX.

Característica	Valor	Unidad
Error promedio coordenada x .	9.66	[%]
Error promedio coordenada y .	9.35	[%]
Error promedio de área.	0.90	[%]
Error promedio de la fuerza F	12.55	[%]

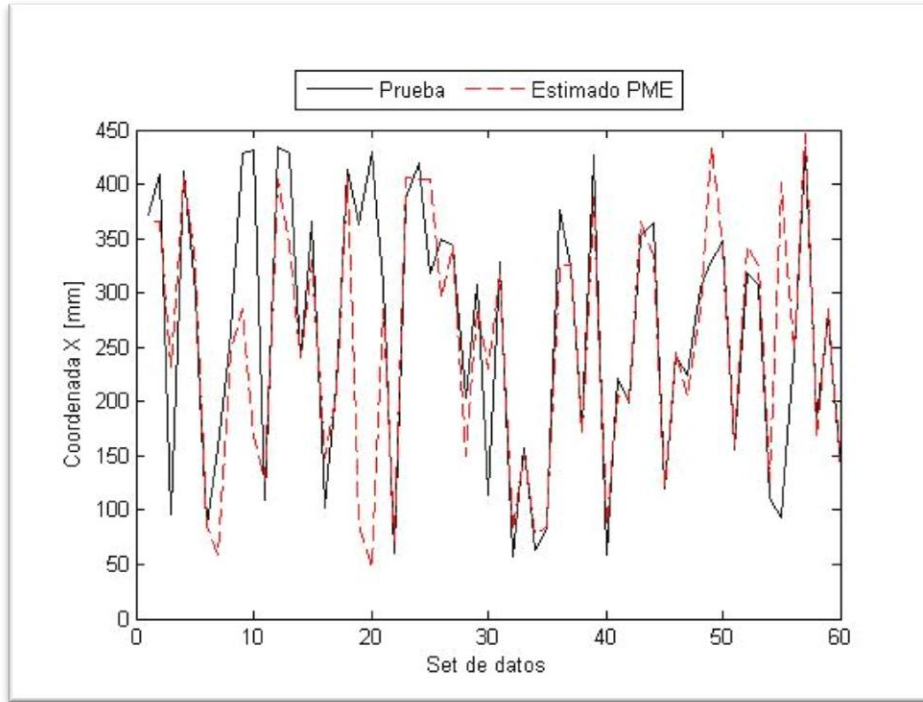


Figura 5.17 Coordenada X experimental y estimada con BINTP-MAX.

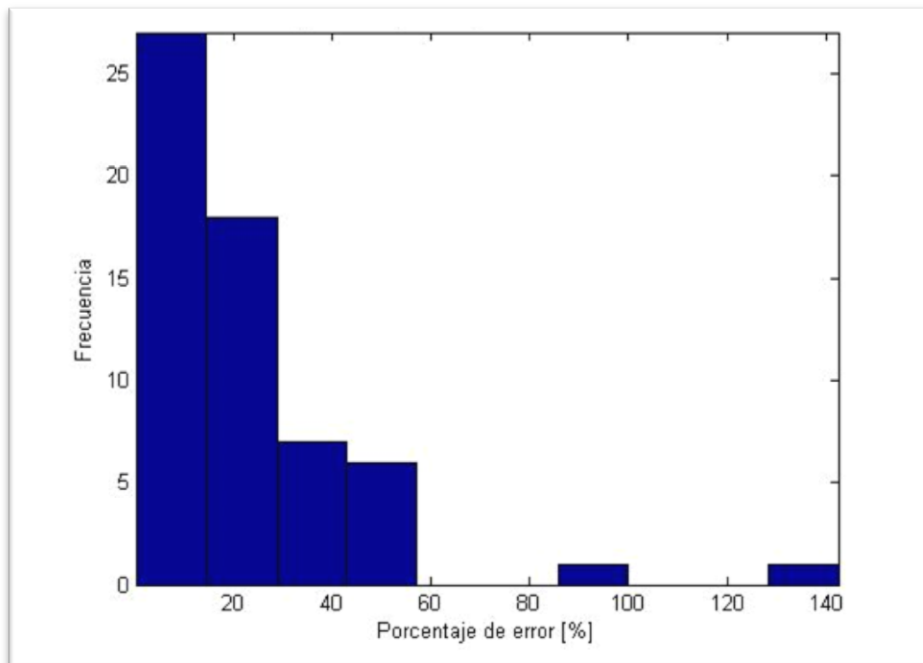


Figura 5.18 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BINTP-MAX.

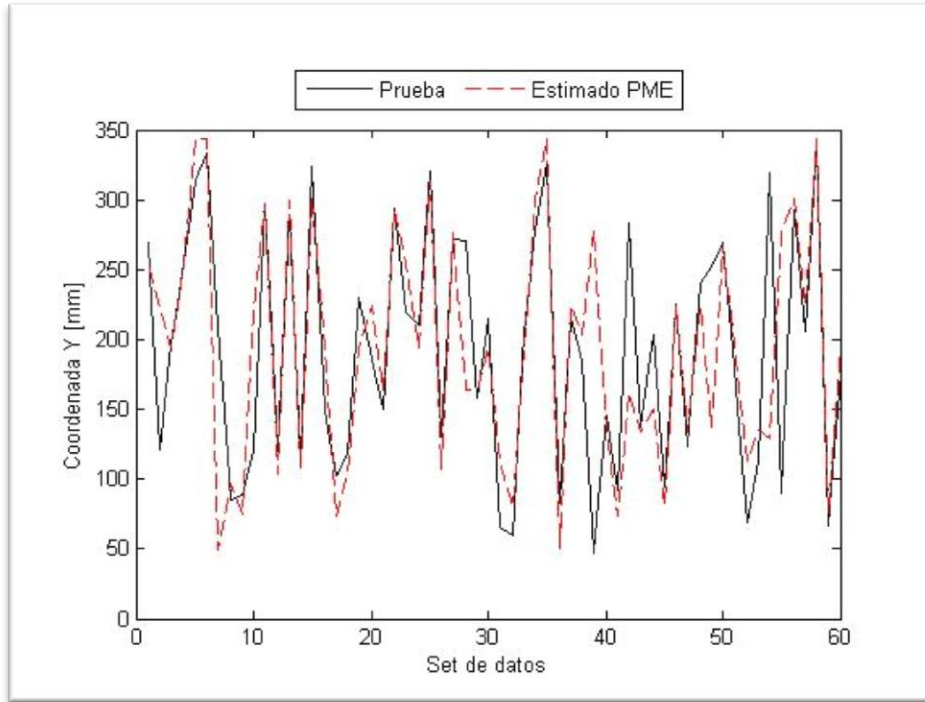


Figura 5.19 Coordenada Y experimental y estimada con BIN-MAX.

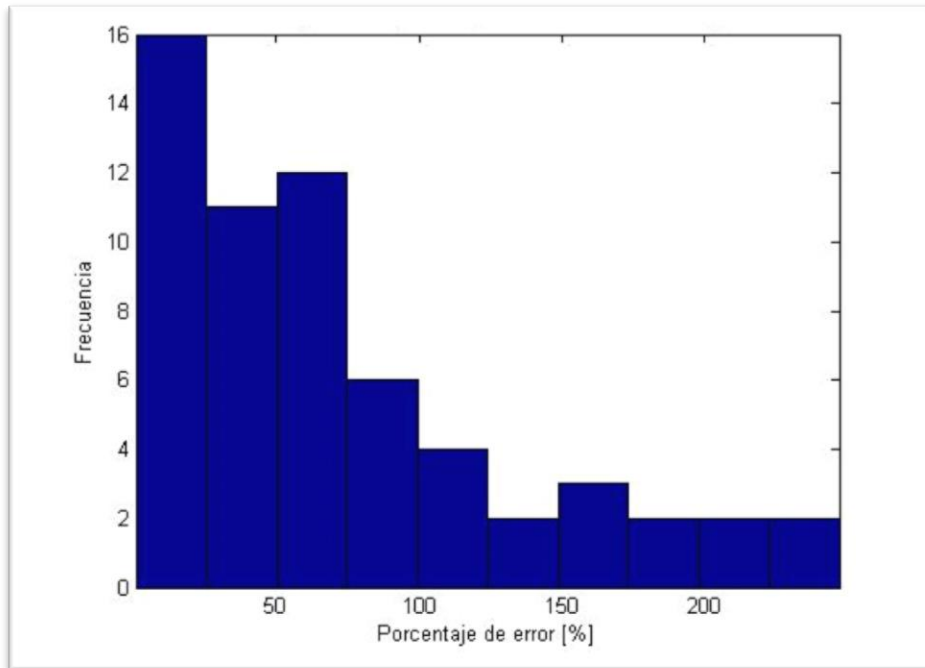


Figura 5.20 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BINTP-MAX.

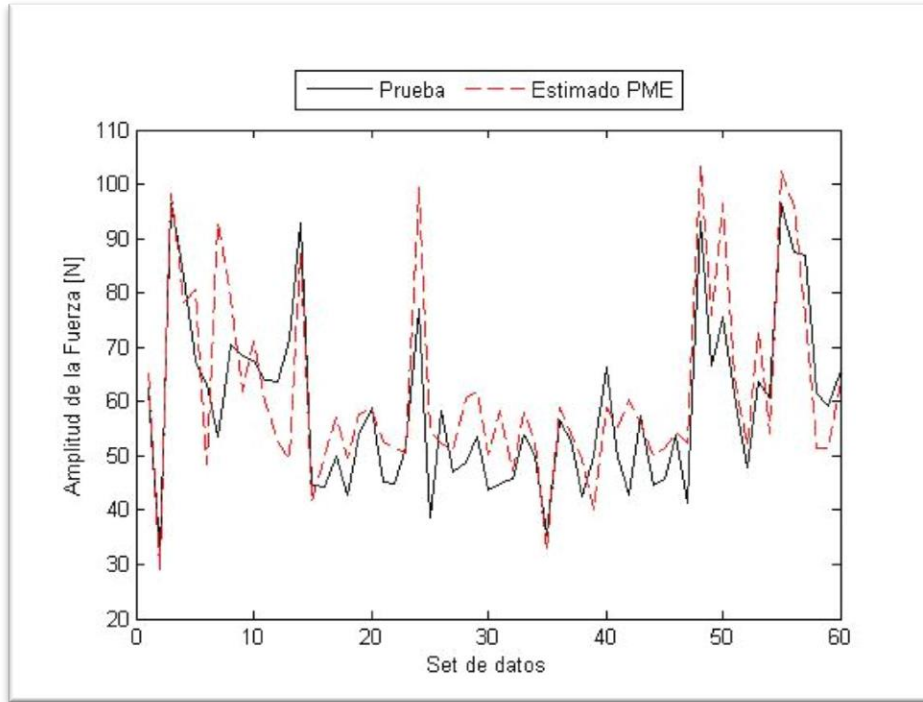


Figura 5.21 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BINTP-MAX.

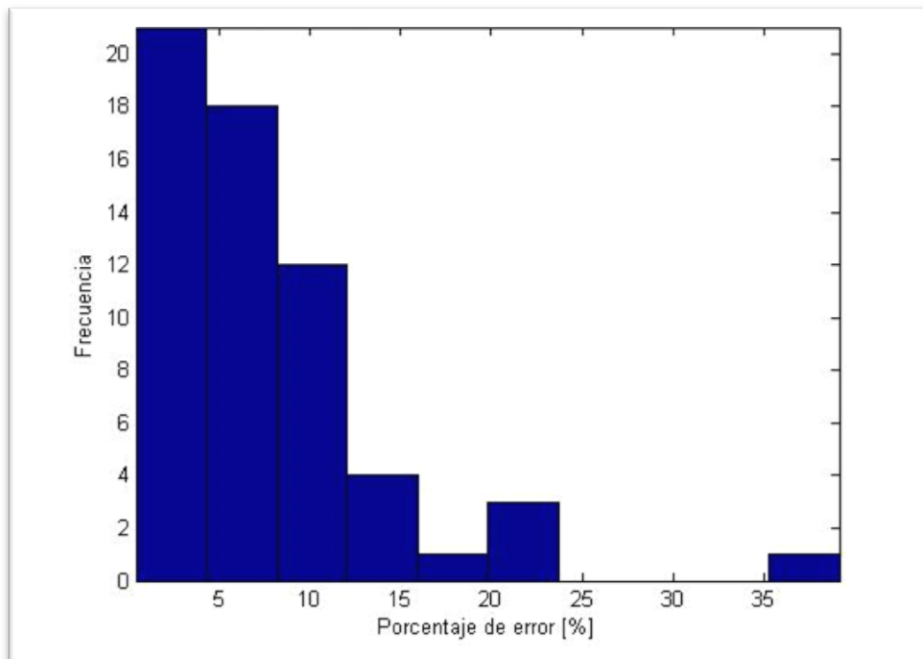


Figura 5.22 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BINTP-MAX.

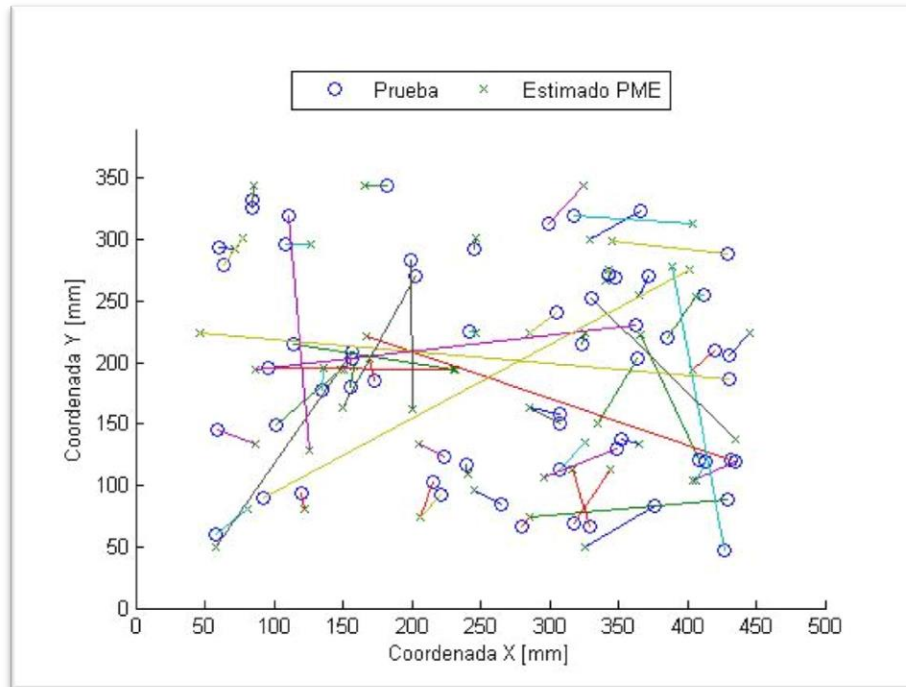


Figura 5.23 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BINTP-MAX.

5.5. BASE CON AMPLITUDES NORMALIZADAS Y TIEMPO PONDERADOS – FINDPEAKS (BINTP-FP).

Una vez completado el ciclo de modificaciones realizadas a las matrices, se cambia el tipo de búsqueda de máximos en la señal. El nuevo método de búsqueda de máximos se puede combinar con cualquiera de las tres formas de matrices mencionadas. Solo se ha dejado en esta sección la base de tipo BINTP-FP las versiones BSA – FP y BIN- FP son redundantes y no presentan mejor desempeño que BINTP-FP, de todas formas, los resultados obtenidos aparecen en el Anexo C.1y C.2 respectivamente.

Para el caso FINDPEAKS, en lugar de utilizarse únicamente la función MAX para encontrar el máximo global de cada señal, se utiliza una combinación de las funciones MAX y FINDPEAKS de MATLAB, ya que esta última permite localizar y almacenar máximos locales.

Al igual que en las bases MAX se utiliza la función homónima para encontrar los máximos globales de todas las señales, los que se utilizan como el valor de la fuerza de impacto y amplitud de deformación máxima. Sin embargo para el cálculo del tiempo de

llegada se busca máximos locales cuyo altura mínima sea una fracción del máximo global de la misma señal, así para el tiempo de llegada se considera el tiempo que transcurre entre el máximo de la señal de fuerza y el primer máximo local que cumpla con el requisito. El programa que realiza este procedimiento se encuentra en el Anexo B.2 Función: Filtrar Señales.

Para definir el porcentaje de la altura del máximo local que se utilizará como mínimo aceptable se utilizan una serie de programas que replican la creación de bases que descritas anteriormente pero utilizando un porcentaje de altura mínimo como una variable a definir. En el programa que se encuentra en el Anexo B.7 Función Evaluar Base Porcentaje, se evalúa el desempeño de una base tipo BIN-TP utilizando alturas mínimas entre 1.25% y 95% del máximo. Los programas “Caja Madre Porcentajes” del Anexo B.9 y “Filtrar Señales Porcentajes” permiten crear una base para el PME con cualquier porcentaje de altura mínima admisible; por otro lado la función “Evaluar Base Silente” del Anexo B.10 es una versión simplificada de “Evaluar Base” -Anexo B.6- de manera de evaluar rápidamente una base para determinar el desempeño del porcentaje.

Los resultados obtenidos se pueden ver en la Figura 5.24, dónde el error mínimo se muestra con un círculo, en la Tabla 5.4 están sus valores numéricos. Se opta por escoger una amplitud admisible del 52.75% por que el Error de Fuerza $-E_F$ (2.64)- es mas sensible a la variación de este parámetro.

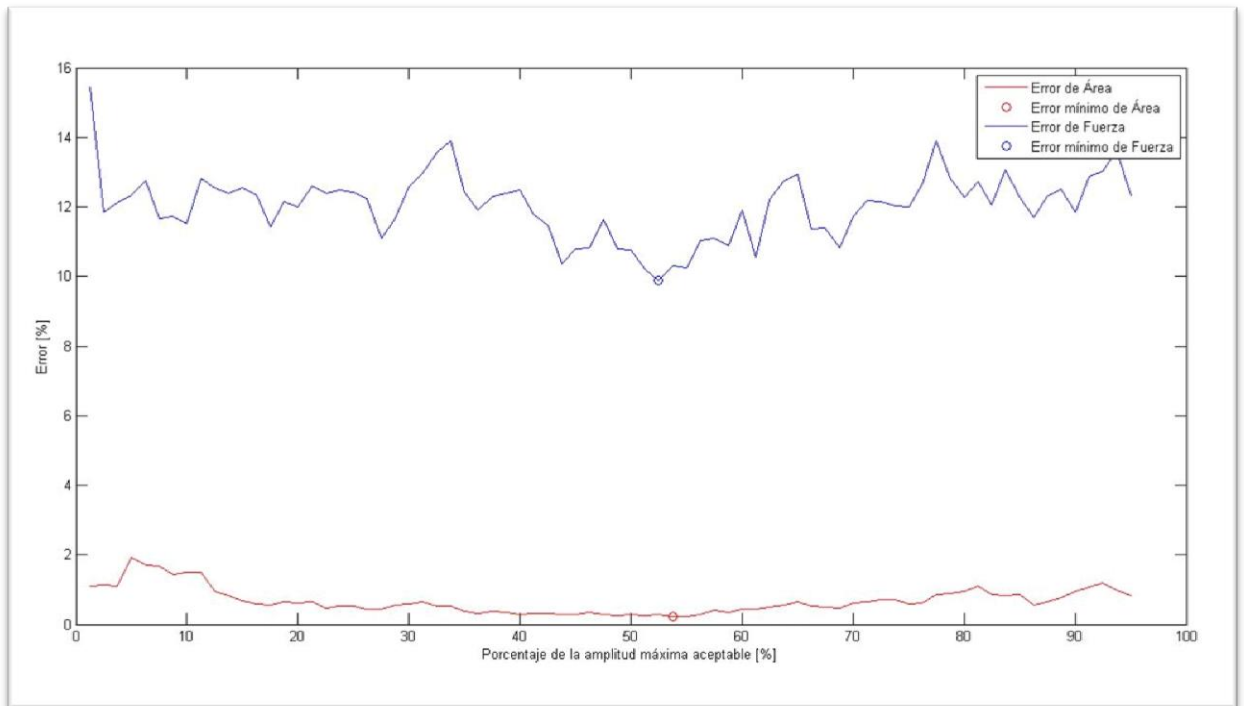


Figura 5.24 Resultado de Error de área y de fuerza según amplitud admisible.

Tabla 5.4 Resultados de errores mínimos de área y fuerza según amplitud admisible.

Tipo	Error	Unidad	Amplitud admisible	Unidad
Mínimo de E_A	0.214	[%]	53.75	[%]
Mínimo de E_F	9.897	[%]	52.5	[%]

Los resultados obtenidos por la base BINTP-FP se resumen en la Tabla 5.5. En la Figura 5.25 y Figura 5.27 se pueden ver la diferencia entre la estimación y el valor real para x e y , los errores en esas mismas coordenadas están en la Figura 5.26y la Figura 5.28 respectivamente, en la Figura 5.31 se puede comparar gráficamente la posición de los valores estimados con los de la prueba. Un mayor detalle de la estimación de la fuerza puede obtenerse de la Figura 5.29 y el histograma del error asociado se encuentra en Figura 5.30.

Tabla 5.5 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BINTP-FP.

Característica	Valor	Unidad
Error promedio coordenada x.	4.68	[%]
Error promedio coordenada y.	6.01	[%]
Error promedio de área.	0.28	[%]
Error promedio de la fuerza F	9.90	[%]

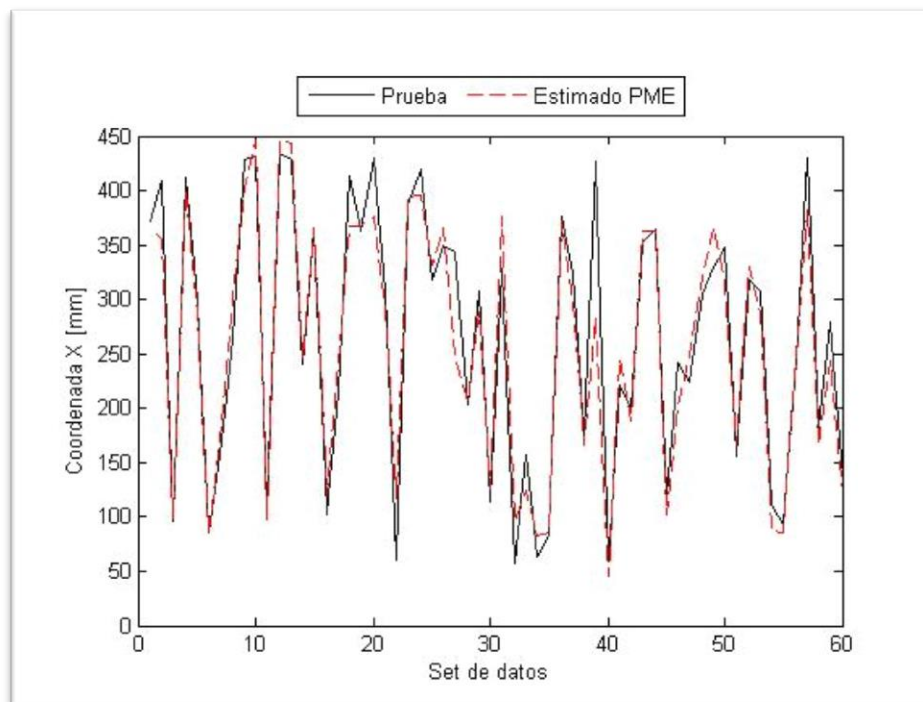


Figura 5.25 Coordenada X experimental y estimada con BINTP-FP.

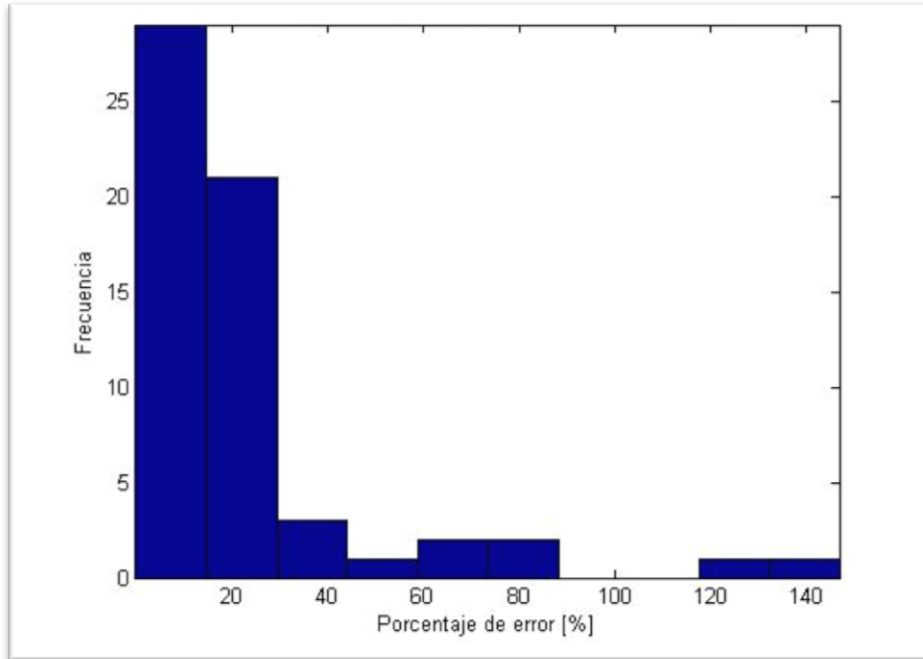


Figura 5.26 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BINTP-FP.

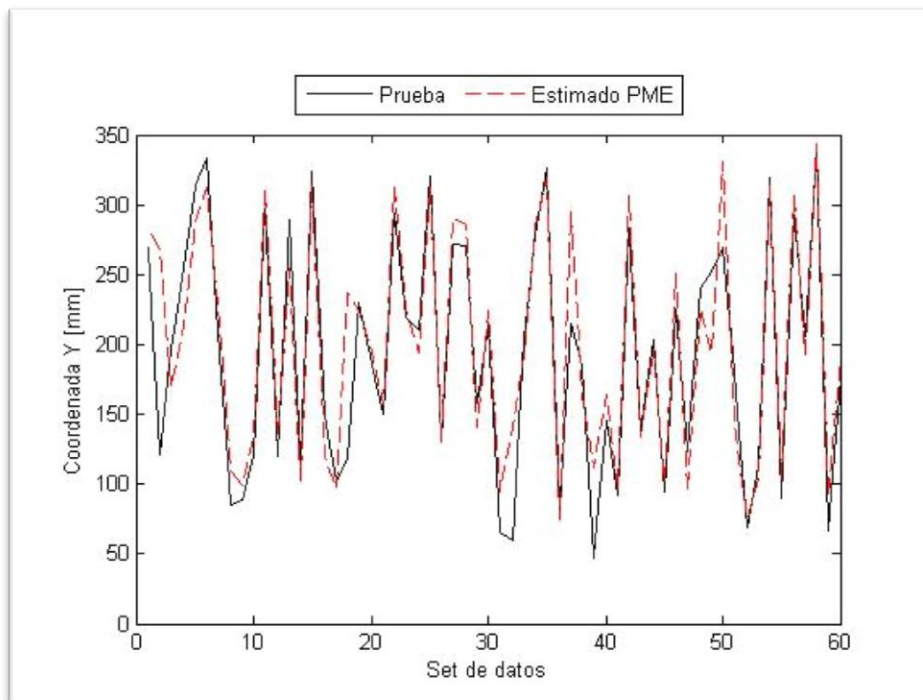


Figura 5.27 Coordenada Y experimental y estimada con BINTP-FP.

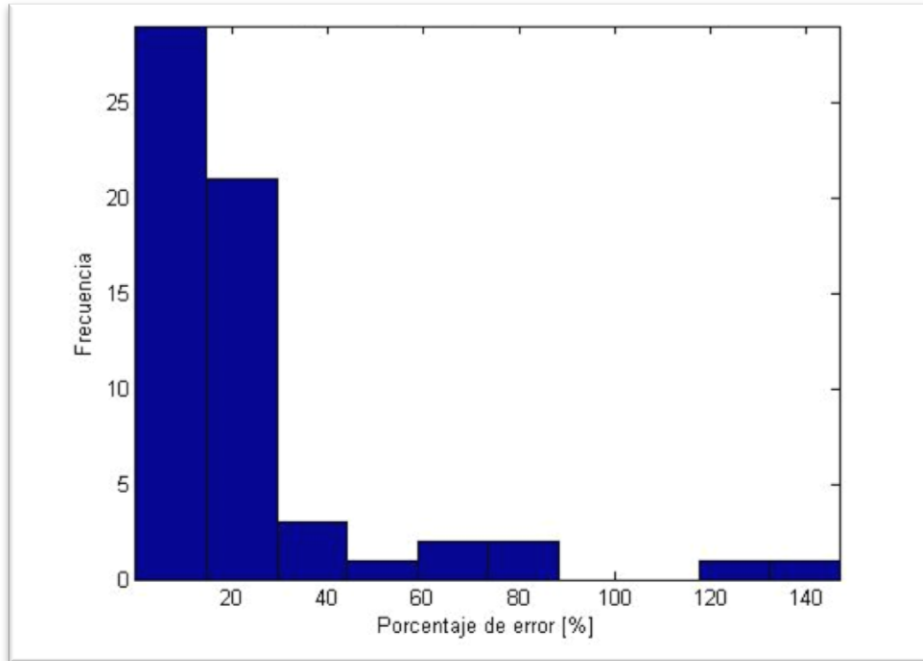


Figura 5.28 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BINTP-FP.

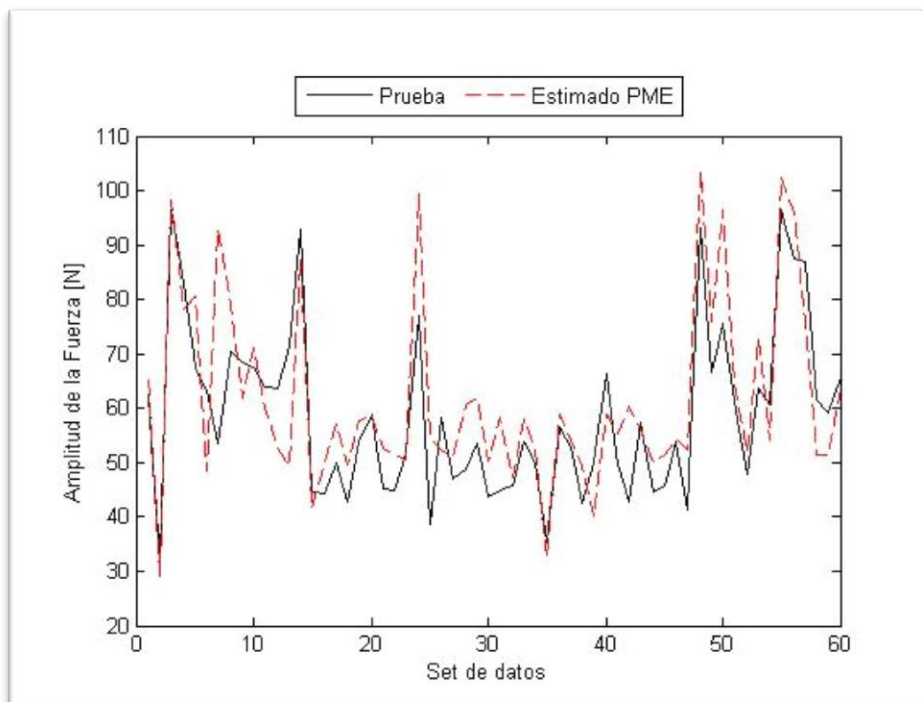


Figura 5.29 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BINTP-FP.

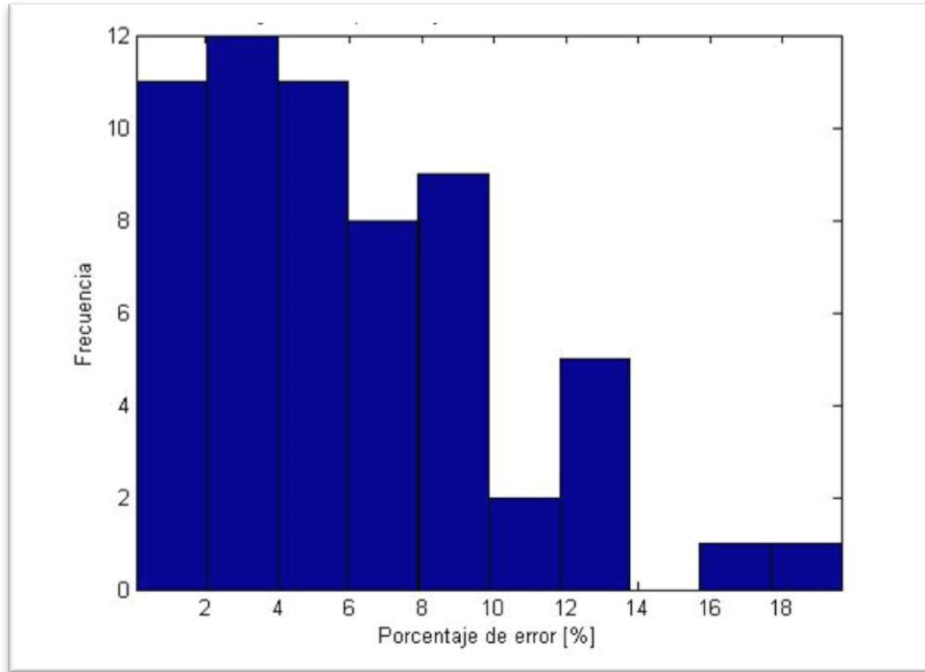


Figura 5.30 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BINTP-FP.

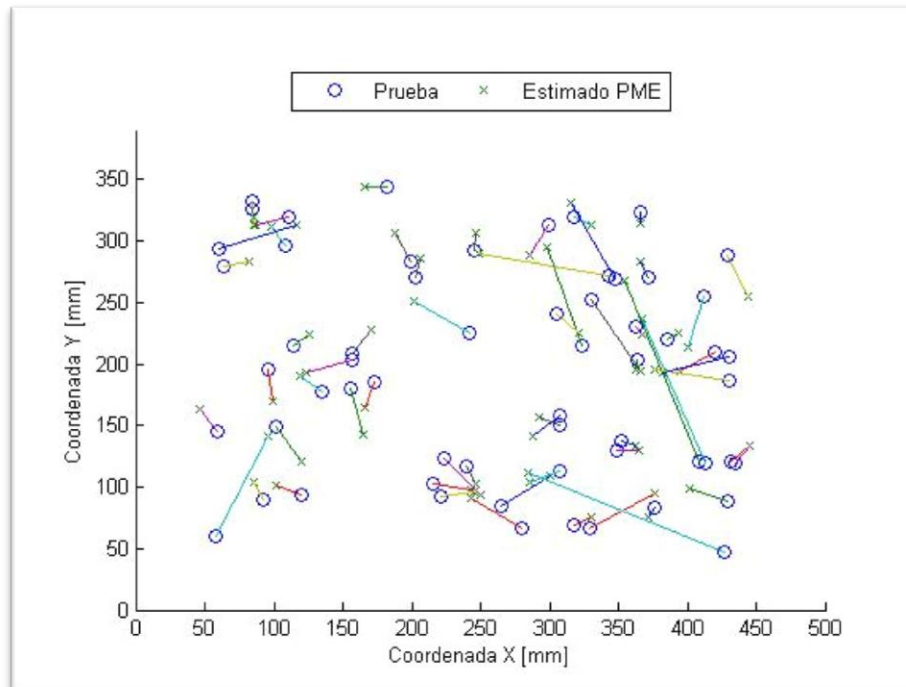


Figura 5.31 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BINTP-FP.

6. DISCUSIONES.

6.1. NÚMERO DE VECINOS, GAMMA Y DESEMPEÑO DE LA BASE.

Error promedio de fuerza:

El error promedio de área no sufre un descenso drástico en el inicio, si no que desciende lentamente a medida que aumenta el número de vecinos. Esto se puede explicar puesto que la fuerza del impacto es aleatoria con cada prueba, por lo que incorpora vecinos que no se encuentran cercanos en el ámbito espacial, pero si presentan amplitudes de respuesta similares; por lo que realizar un proceso de normalización de las fuerza y sus respuestas vibratorias agregaría elementos cercanos a la vecindad en el ámbito de área con nuevos valores de fuerza lo que beneficia a ambos parámetros. Esto sirve de fundamento para la creación de bases del tipo BIN.

Error promedio de área:

El error promedio del área presenta una disminución considerable hacia los tres primeros vecinos y posteriormente se mantiene casi constante, esto significa que los nuevos vecinos que se agregan a las estimaciones no están aportando a la determinación de la posición del impacto. Lo que significa que debido a la gran diferencia de orden de magnitud que existe entre los valores del tiempo de llegada y los valores de amplitud máxima, el sistema está optando por elegir estos últimos, lo que sugiere que es necesario ponderar los tiempos por un valor que los haga comparables para que el método pueda incorporarlos. El razonamiento planteado permite desarrollar las bases de datos del tipo BINTP.

Gamma y número de vecinos:

Se observa que inicialmente el gamma parte con un valor muy alto, debido a que el problema está constreñido a un solo vecino, el rápido descenso que sufre posteriormente significa que si se están incorporando nuevos vecinos a la estimación, sin embargo cuando este número llega a 10, gamma se estanca en un valor muy bajo, lo que significa que un mayor número de elementos de la base de datos aportando a la estimación pero con un aporte individual decreciente. Esto permite fijar un número de vecinos, sobre 10, con los que se agrupa a gran parte de los elementos que permiten una buena estimación. Dado que la menor de las bases de datos utilizadas posee 117 elementos, se escoge 16 como el número máximo de vecinos, que representará el 13% del total de la base más pequeña.

6.2. RESULTADOS.

En primer lugar se observa que el método de aproximación lineal mediante el principio de máxima entropía, utilizado con la base de datos menos desarrollada, BSA-MAX, es capaz de entregar estimaciones moderadamente correctas en localización de impactos (Error promedio de área: 3.5%) y correctas en fuerza del impacto (Error promedio de fuerza: 15.53%) estos valores se establecen como el punto de partida para con el cual se trabaja en la modificación y creación de nuevas bases para obtener mejores resultados.

Como se explica en la sección anterior BSA-MAX presenta dos problemas para la aplicar el método de máxima entropía: que la gran variabilidad de la fuerza de los impactos no garantiza la aparición de vecinos que sean cercanos tanto en área como en la fuerza y que la gran diferencia en órdenes de magnitud entre la amplitud y la los tiempos de llegada afectan la elección de vecinos que mejoren la posición.

La respuesta ante el primer problema es la creación de la base BIN-MAX, donde se obtienen leves mejorías tanto en la estimación de la fuerza (Error promedio de fuerza: 13.61%) como en la localización del impacto (Error promedio de área: 3.11%). Esto significa que con una base de datos más grande y con vecinos más cercanos en amplitud se obtienen estimaciones de fuerza más adecuadas, pero estas no están necesariamente en la vecindad de área y normalizar una base de datos con fuerzas menores a 1 y amplitudes pequeñas no es suficiente para lograr que el sistema agregue datos relevantes en localización. Lo que refuerza la idea de ponderar los tiempos de llegada por un valor que los equipare a la amplitud de la respuesta en orden de magnitud.

La matriz BINTP-MAX resulta de la conjugación de BIN y la ponderación de tiempos, se obtiene una notoria mejoría en localización (Error promedio de área: 0.9%) refuerza la idea que los parámetros de la matriz deben ser del orden de magnitud similares para que no se perjudique ningún aspecto de la estimación, el aumento de la precisión para cuantificación de la fuerza (Error promedio de fuerza: 12.55%) confirma que la localización y fuerza no son independientes para método.

Las bases con el método de búsqueda FINDPEAKS y matrices de tipo BSA y BIN presentan las mismas progresiones proporcionales localización de impacto y cuantificación de la fuerza.

El notorio aumento de la precisión en cuantificación de la fuerza (Error promedio de fuerza: 9.9%) y localización de impactos (Error promedio de área: 0.28%) al utilizar la base BINTP-FP, se debe en parte a que utiliza la matriz que ha tenido mejores resultados para el método MAX y que además incorpora elementos de este en la determinación de tiempos de llegada.

La aplicación del método FINDPEAKS, está basada en la observación de señales como la que se muestra en la Figura 6.1, dónde se distingue claramente la aparición de varios

máximos locales antes del máximo global, es posible notar que al elegir el máximo global en lugar del primer máximo local el tiempo de llegada varía notoriamente. Sin embargo el máximo global resulta ser buen parámetro para obtener la fuerza del impacto, por lo que es importante conservar esta información, finalmente se opta por utilizar las amplitudes obtenidas por el máximo global y el tiempo de llegada como la diferencia entre el máximo global de la fuerza y el primer máximo local que posea al menos un 52.5% de la altura del máximo global.

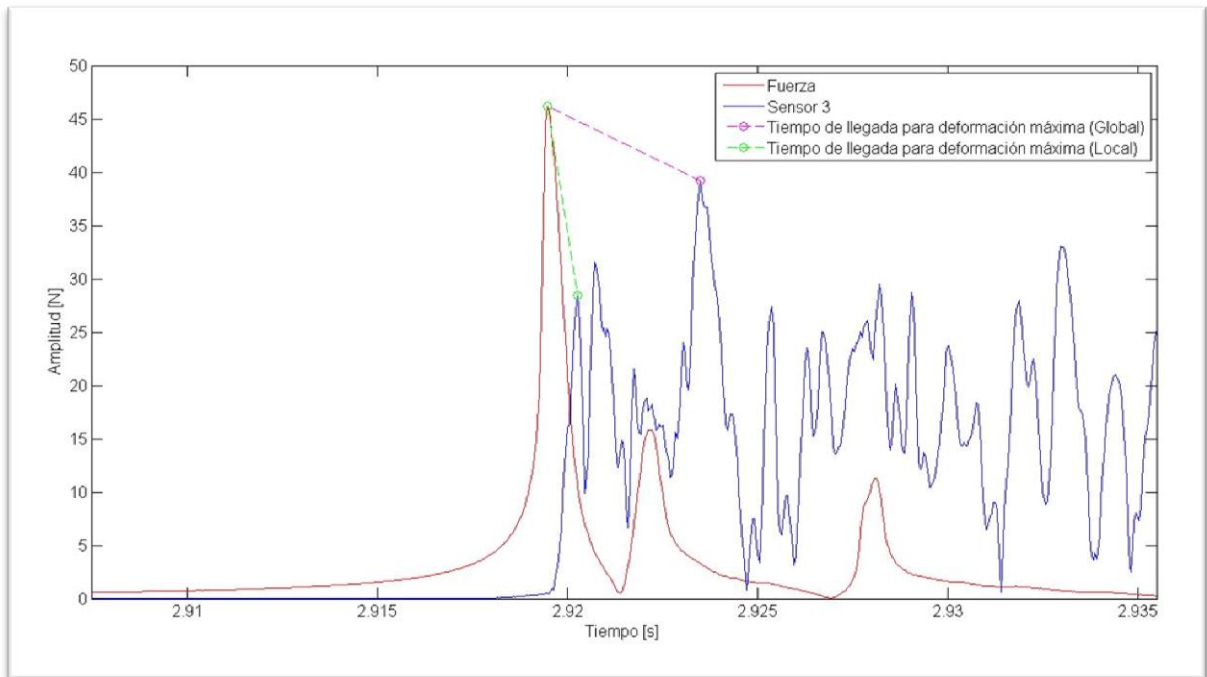


Figura 6.1 Comparación de señal de fuerza y señal de deformación ele tiempo.

La aparición de estos máximos locales comparables tiene su explicación en los sensores utilizados, al tener un superficie en contacto con el material, la vibración es capaz de viajar a través del sensor, provocando en él una deformación no uniforme en toda el área, haciendo que el piezoeléctrico se contraiga parcialmente y registre solo una parte de la vibración total lo que se observa como máximos locales comparables en los gráficos en el tiempo.

Comparación con otros trabajos del tema:

Respecto de la comparación de los resultados obtenidos con los disponibles en la literatura del tema se tiene la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Resultados comparados para localización de impactos.

Trabajo:	N° de sensores	Tamaño de placa (mm ²)	Error de Área (%)	Eficiencia de precisión (%)
Worden y Staszewski (ANN) [10].	17	540x300	0.37	0.033
Haywood et al (ANN) [11].	12	608x304	0.21	0.013
Xie (LSSVM) [12].	9	400x320	0.04	0.0131
Xu (LSSVM) [1]	4	490x390	1.06	0.152
Xu (ANN) [1]	4	490x390	2.73	0.149
BINTP - FP.	4	490x390	0.28	0.213

Respecto de las diferencias que existen entre los trabajos de la Tabla 6.1, se destaca que [10] [11] y [12] utilizan placas de materiales compuestos comúnmente utilizado para fuselajes de aviones comerciales, con fibras de carbono e incluso en el caso de [10] placas de aluminio delgadas para simular el esqueleto del fuselaje. Solamente en el caso del presente trabajo y en Xu [1] se utilizan placas de aluminio para el estudio de la detección de impactos.

Respecto de los sensores utilizados, todos los trabajos utilizan sensores piezoeléctricos, siendo la gran diferencia Haywood [11] quien conecta la serie de sensores mediante una red y los incorpora dentro de la curación entre las placas de material compuesto.

El método con que se obtiene el mejor desempeño para Worden y Staszewski [10] es el de las Redes Neuronales Artificiales (en inglés *Artificial Neural Networks* o ANN) al igual que para Haywood et al [11]. En cambio para Xie [12] y Xu [1] el mejor resultado proviene de utilizar el método de regresión no lineal llamado *Least Square Support Vector Machines* (en adelante LSSVM).

Se observa que el presente trabajo presenta un desempeño competitivo en el área de localizaciones de impacto, destacándose por sus resultados a pesar de utilizar un número muy inferior de sensores a los utilizados en [10] [11] y [12], lo que contribuye también a una mayor Eficiencia de precisión. Esto es gracias a la utilización de un método de regresión lineal de gran capacidad y la aplicación estratégica de métodos matemáticos para mejorar la información de entrada.

En el área de cuantificación de la fuerza el trabajo de Xu, obtuvo un promedio de error de fuerza sobre el 50% [1], del resto trabajos mostrados en la Tabla 6.1 solamente el de Worden y Staszewski [10] incluye este parámetro y obtiene un error de 20.1%. Ambos resultados son inferiores al 9.9% para BINTP-FP. Es destacable que tanto que los métodos con mejor desempeño utilizados en [1] (LSSVM) cómo [10] (ANN) requieren crear un sistema aparte del utilizado para la localización de impactos, mientras que el método de PME permite integrar ambos en un solo procedimiento.

7. CONCLUSIONES.

El presente trabajo se enfoca en el funcionamiento del método de aproximación lineal y el principio de máxima entropía para la detección, localización y cuantificación de impactos en placas planas. Esto se realiza mediante la construcción y utilización de un banco de pruebas que permite obtener la fuerza del impacto y las respuestas vibratorias, para extraer la amplitud de deformación máxima y la diferencia de tiempo entre esta y el impacto, con esta información y el entorno MATLAB se crea una base de datos a la cual se le aplica el algoritmo para obtener la localización y magnitud de un impacto nuevo en base a la amplitud de deformación y el tiempo de llegada.

Se concluye que para este tipo de aplicaciones, la vecindad que se utiliza para estimar linealmente el nuevo valor, para obtener resultados aceptables, no requiere sobrepasar el 15% del total de la base, más allá de este valor, el parámetro gamma que regula la influencia de los vecinos mediante una aproximación gaussiana no disminuye considerablemente, por lo que cada vecino disminuye su aporte individual.

La principal conclusión que se puede desprender del presente trabajo, tiene que ver sobre su éxito al momento de localizar y cuantificar impactos, gracias al desarrollo de bases de datos que utilizan la información experimental obtenida, para agregar nueva información o mejorar la existente sin tener regresar a la fase de experimentación. Estas modificaciones surgen del entendimiento de las particularidades del algoritmo utilizado, del conocimiento de vibraciones mecánicas y procesamiento de la información. El trabajo desarrollado obtiene un promedio de error de área del impacto 0.28%, competitivo con otros algoritmos que utilizan mayor cantidad de sensores. El promedio de error de impacto alcanza un 9.9%, mucho más bajo que el alcanzado por otros trabajos con la misma disposición experimental.

A futuro, se propone estudiar el desempeño del método cambiando la placa plana de aluminio por placas planas y curvadas de material compuesto tipo “panel de abeja” típicamente utilizados en fuselajes de aeroplanos y en otros estudios de la detección de impactos. Otro enfoque futuro sería profundizar la investigación de la deformación vibratoria de las placas, para mejorar la selección de parámetros relevantes -aumentar el número de “peaks” a utilizar o calcular el tiempo de llegada sin utilizar la señal del martillo- y acercarse hacia la utilización de métodos de predicción de impactos para el BVID.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Q. Xu, "Impact detection and location for a plate structure using least square support vector machines," *Structural Health Monitoring*, pp. 5-18, 2013.
- [2] V. Meruane, *Vibraciones Mécanicas. Apuntes para el curso ME4701*, Santiago., 2010.
- [3] V. Meruane, *Dinámica Estructural Apuntes para el curso ME7606*, 2015.
- [4] V. Meruane and A. Ortiz, "Structural Damage assesment using linear approximation with maximun entropy and transmissibility data.," *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 210-223, 2013.
- [5] N. Sukumar, "Construction of polygonal interpolants: a maximum entropy aproach.," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, no. 61, pp. 2159-2181, 2004.
- [6] Alcoa Inc., "Matweb," MatWeb, LLC, 2011. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=626ec8cdca604f1994be4fc2bc6f7f63>. [Accessed 01 10 2015].
- [7] Murata Manufacturing Co.,Ltd., "www.murata.com," 08 01 2010. [Online]. Available: www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/sound/p37e.ashx?la=en-gb. [Accessed 15 10 08].
- [8] Global Sensor Technology., "Global Sensor Technology," 2015. [Online]. Available: <http://www.globalsensortech.com/signal-generators-power-supplies-calibrators-impact-hammers/impact-hammers/impact-hammer-lc-01a>. [Accessed 09 10 15].
- [9] Econ-Group, *MI7016 Manual of Operation*, Shangai, 2013.
- [10] K. Worden and W. J. Staszewski, "Impact location and quantification on a composite panel using neural networks and a genetic algorithm.," *Strain*, vol. 2, no. 36, pp. 61-68, 2000.
- [11] J. Haywood, P. T. Coverley, W. J. Staszewski and K. Worden, "An automatic impact monitor for a composite panel employing smart sensor technology.," *Smart Mater Struct*, vol. 1, no. 14, pp. 265-271, 2005.
- [12] J. Xie, "Kernel optimization of LS-SVM based on damage detection for smart structures.," in *Proceedings of IEEE international conference on computer science and information.*, Beijing, China., 2009.

- [13] M. De Stefano, M. Gherlone, M. Mattone, M. Di Sciuva and K. Worden, "Optimum Sensor Placement for Impact Location Using Trilateration," *Strain*, pp. 61-73, 2014.

A. POSICIONES DE LOS IMPACTOS.

Para el presente trabajo se utilizó placa plana de aleación de Aluminio AL6061, de dimensiones de 490mm x 390 mm x 2,5 mm. La posición de los sensores en la placa corresponde a (170 mm, 290 mm), (320 mm, 290 mm), (320 mm, 100 mm) y (170 mm, 100 mm). En este anexo se detallan todas las posiciones de los impactos para la base de datos y para las pruebas.

Se considera que la coordenada x corresponde al lado más largo de la placa (490 mm) y la coordenada y al lado más corto (390 mm).

A.1 SET DE IMPACTO PARA BASE DE DATOS:

El set para la base de datos corresponde a 117 impactos cuyas posiciones encuentran detalladas en la Tabla A.1.

Tabla A.1 Posición de los impactos para la base de datos.

Impacto	Posición en x	-	Posición en y	-
1	46	[mm]	344	[mm]
2	86	[mm]	344	[mm]
3	126	[mm]	344	[mm]
4	166	[mm]	344	[mm]
5	206	[mm]	344	[mm]
6	246	[mm]	344	[mm]
7	286	[mm]	344	[mm]
8	326	[mm]	344	[mm]
9	366	[mm]	344	[mm]
10	406	[mm]	344	[mm]
11	446	[mm]	344	[mm]
12	46	[mm]	314	[mm]
13	86	[mm]	314	[mm]
14	126	[mm]	314	[mm]
15	166	[mm]	314	[mm]
16	206	[mm]	314	[mm]
17	246	[mm]	314	[mm]
18	286	[mm]	314	[mm]
19	326	[mm]	314	[mm]
20	366	[mm]	314	[mm]

21	406	[mm]	314	[mm]
22	446	[mm]	314	[mm]
23	46	[mm]	284	[mm]
24	86	[mm]	284	[mm]
25	126	[mm]	284	[mm]
26	206	[mm]	284	[mm]
27	246	[mm]	284	[mm]
28	286	[mm]	284	[mm]
29	366	[mm]	284	[mm]
30	406	[mm]	284	[mm]
31	446	[mm]	284	[mm]
32	46	[mm]	254	[mm]
33	86	[mm]	254	[mm]
34	126	[mm]	254	[mm]
35	166	[mm]	254	[mm]
36	206	[mm]	254	[mm]
37	246	[mm]	254	[mm]
38	286	[mm]	254	[mm]
39	326	[mm]	254	[mm]
40	366	[mm]	254	[mm]
41	406	[mm]	254	[mm]
42	446	[mm]	254	[mm]
43	46	[mm]	224	[mm]
44	86	[mm]	224	[mm]
45	126	[mm]	224	[mm]
46	166	[mm]	224	[mm]
47	206	[mm]	224	[mm]
48	246	[mm]	224	[mm]
49	286	[mm]	224	[mm]
50	326	[mm]	224	[mm]
51	366	[mm]	224	[mm]
52	406	[mm]	224	[mm]
53	446	[mm]	224	[mm]
54	46	[mm]	194	[mm]
55	86	[mm]	194	[mm]
56	126	[mm]	194	[mm]
57	166	[mm]	194	[mm]
58	206	[mm]	194	[mm]
59	246	[mm]	194	[mm]
60	286	[mm]	194	[mm]
61	326	[mm]	194	[mm]

62	366	[mm]	194	[mm]
63	406	[mm]	194	[mm]
64	446	[mm]	194	[mm]
65	46	[mm]	164	[mm]
66	86	[mm]	164	[mm]
67	126	[mm]	164	[mm]
68	166	[mm]	164	[mm]
69	206	[mm]	164	[mm]
70	246	[mm]	164	[mm]
71	286	[mm]	164	[mm]
72	326	[mm]	164	[mm]
73	366	[mm]	164	[mm]
74	406	[mm]	164	[mm]
75	446	[mm]	164	[mm]
76	46	[mm]	134	[mm]
77	86	[mm]	134	[mm]
78	126	[mm]	134	[mm]
79	166	[mm]	134	[mm]
80	206	[mm]	134	[mm]
81	246	[mm]	134	[mm]
82	286	[mm]	134	[mm]
83	326	[mm]	134	[mm]
84	366	[mm]	134	[mm]
85	406	[mm]	134	[mm]
86	446	[mm]	134	[mm]
87	46	[mm]	104	[mm]
88	86	[mm]	104	[mm]
89	126	[mm]	104	[mm]
90	206	[mm]	104	[mm]
91	246	[mm]	104	[mm]
92	286	[mm]	104	[mm]
93	366	[mm]	104	[mm]
94	406	[mm]	104	[mm]
95	446	[mm]	104	[mm]
96	46	[mm]	74	[mm]
97	86	[mm]	74	[mm]
98	126	[mm]	74	[mm]
99	166	[mm]	74	[mm]
100	206	[mm]	74	[mm]
101	246	[mm]	74	[mm]
102	286	[mm]	74	[mm]

103	326	[mm]	74	[mm]
104	366	[mm]	74	[mm]
105	406	[mm]	74	[mm]
106	446	[mm]	74	[mm]
107	46	[mm]	44	[mm]
108	86	[mm]	44	[mm]
109	126	[mm]	44	[mm]
110	166	[mm]	44	[mm]
111	206	[mm]	44	[mm]
112	246	[mm]	44	[mm]
113	286	[mm]	44	[mm]
114	326	[mm]	44	[mm]
115	366	[mm]	44	[mm]
116	406	[mm]	44	[mm]
117	446	[mm]	44	[mm]

A.2 SET DE IMPACTOS PARA PRUEBAS.

El set para las pruebas del método PME corresponde a 60 impactos cuyas posiciones fueron determinadas aleatoriamente, estas se encuentran detalladas en Tabla A.2.

Tabla A.2 Posición de los impactos para pruebas.

Impacto	Posición en X	-	Posición en Y	-
1	372	[mm]	270	[mm]
2	409	[mm]	121	[mm]
3	96	[mm]	196	[mm]
4	412	[mm]	255	[mm]
5	299	[mm]	313	[mm]
6	85	[mm]	333	[mm]
7	157	[mm]	209	[mm]
8	265	[mm]	85	[mm]
9	429	[mm]	89	[mm]
10	432	[mm]	121	[mm]
11	109	[mm]	297	[mm]
12	435	[mm]	120	[mm]
13	429	[mm]	289	[mm]

14	240	[mm]	117	[mm]
15	366	[mm]	324	[mm]
16	102	[mm]	149	[mm]
17	215	[mm]	103	[mm]
18	413	[mm]	119	[mm]
19	363	[mm]	230	[mm]
20	430	[mm]	186	[mm]
21	308	[mm]	150	[mm]
22	60	[mm]	294	[mm]
23	386	[mm]	220	[mm]
24	420	[mm]	210	[mm]
25	318	[mm]	320	[mm]
26	349	[mm]	130	[mm]
27	343	[mm]	272	[mm]
28	203	[mm]	271	[mm]
29	308	[mm]	158	[mm]
30	114	[mm]	215	[mm]
31	329	[mm]	66	[mm]
32	58	[mm]	60	[mm]
33	157	[mm]	204	[mm]
34	64	[mm]	279	[mm]
35	84	[mm]	326	[mm]
36	376	[mm]	83	[mm]
37	324	[mm]	215	[mm]
38	173	[mm]	185	[mm]
39	427	[mm]	47	[mm]
40	59	[mm]	145	[mm]
41	221	[mm]	92	[mm]
42	199	[mm]	283	[mm]
43	352	[mm]	137	[mm]
44	364	[mm]	203	[mm]
45	120	[mm]	94	[mm]
46	242	[mm]	225	[mm]
47	224	[mm]	123	[mm]
48	305	[mm]	241	[mm]
49	330	[mm]	252	[mm]
50	348	[mm]	269	[mm]
51	156	[mm]	180	[mm]
52	318	[mm]	69	[mm]
53	308	[mm]	113	[mm]
54	111	[mm]	319	[mm]

55	93	[mm]	90	[mm]
56	245	[mm]	293	[mm]
57	430	[mm]	206	[mm]
58	182	[mm]	344	[mm]
59	280	[mm]	67	[mm]
60	135	[mm]	177	[mm]

B. ANEXOS: CÓDIGOS DE IMPORTANCIA.

B.1 FUNCIÓN: TABULAR CARPETAS.

```
function [Impacto] = Tabular_Carpetas (Direccion)
% Tabular lee los 4 archivos de texto que producen las mediciones y
entrega
% una tabla con el tiempo, la fuerza y las deformaciones en cada sensor.
cd(Direccion); %Abro carpeta tipo "Impacto N°"

%Crea tablas para la fuerza y la deformación de los sensores en el
tiempo.
Fuerza = InputDataRecorder('Fuerza.txt',14);
Sensor1 = InputDataRecorder('Sensor1.txt',14);
Sensor2 = InputDataRecorder('Sensor2.txt',14);
Sensor3 = InputDataRecorder('Sensor3.txt',14);
Sensor4 = InputDataRecorder('Sensor4.txt',14);

Impacto =
table(Fuerza{:,1},Fuerza{:,2},Sensor1{:,2},Sensor2{:,2},Sensor3{:,2},Sensor4{:,2}); %Unifica las tablas.

Impacto.Properties.VariableNames = {'Tiempo' 'Fuerza' 'Sensor_1'
'Sensor_2' 'Sensor_3' 'Sensor_4'}; %Nombramos columnas.

%Aplico detrend para eliminar constantes producto de deformaciones en los
%sensores y con la envolvente de hilbert obtengo valores estrictamente
%positivos.
Impacto.Fuerza=detrend(Impacto.Fuerza);
Impacto.Fuerza= abs(hilbert(Impacto.Fuerza));

Impacto.Sensor_1=detrend(Impacto.Sensor_1);
Impacto.Sensor_1= abs(hilbert(Impacto.Sensor_1));

Impacto.Sensor_2=detrend(Impacto.Sensor_2);
Impacto.Sensor_2= abs(hilbert(Impacto.Sensor_2));

Impacto.Sensor_3=detrend(Impacto.Sensor_3);
Impacto.Sensor_3= abs(hilbert(Impacto.Sensor_3));

Impacto.Sensor_4=detrend(Impacto.Sensor_4);
Impacto.Sensor_4= abs(hilbert(Impacto.Sensor_4));

end
```

B.2 FUNCIÓN: FILTRAR SEÑALES.

```
%:.....  
:.....
```

```
%En el archivo 'Bloque_Base.mat' aparecen las siguientes Bases de datos:
```

```
%X_BSA: Entrada Base Sin Alteraciones  
%Y_BSA: Salida Base Sin Alteraciones  
%X_BIN: Entrada Base Intensidades Normalizadas  
%Y_BIN: Salida Base Intensidades Normalizadas  
%X_BIN_TP: Entrada Base Intensidades Normalizadas y Tiempos Ponderados  
%Y_BIN_TP: Salida Base Intensidades Normalizadas y Tiempos Ponderados
```

```
%:.....  
:.....
```

```
%En el archivo 'Bloque_Prueba.mat' aparecen las siguientes Set de Pruebas:
```

```
%X_PSA: Entrada Prueba Sin Alteraciones  
%Y_PSA: Salida Prueba Sin Alteraciones  
%X_PTP: Entrada Prueba con Tiempos Ponderados  
%Y_PTP: Salida Prueba con Tiempos Ponderados
```

```
%:.....  
:.....
```

```
function
```

```
Caja_Madre(Tipo,Frecuencia_Muestreo,Interpolante,Tipo_Interpolacion,Dir_Caja,Dir_Bloque,Tipo_Busqueda)
```

```
cd(Dir_Caja) %Abro la carpeta donde se encuentran la caja que que se usara para crear las matrices de ingreso.
```

```
%Compruebo si el usuario ingresó valores de Interpolación.  
if ~isempty(Interpolante) && ~isempty(Tipo_Interpolacion)  
    Interpol = strcat('_x',num2str(Interpolante),'_',Tipo_Interpolacion);  
% Contruyo las siglas correspondientes de la interpolación.  
else  
    Interpol = ''; %Dejo el valor como un elemento vacio.  
end
```

```
%Recreo el nombre de la caja que contiene las tablas con los impactos  
Nombre_Caja =  
strcat('Caja_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol);
```

```
load(Nombre_Caja) %carga la caja que contiene los impactos deseados.
```

```

%Recreo el nombre de la celda que contiene los nombres de todos los
elementos de la caja.
Celda_Nombres =
strcat('Nombres_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol);
%Recreo el nombre de la tabla que contiene las posiciones de todos los
impactos.
Tabla_Posiciones =
strcat('Posiciones_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol
);

Lista_Nombres = eval(Celda_Nombres); %Guardo la celda con lista de
nombres de la caja en Nombres_Base.
Lista_Posiciones = eval(Tabla_Posiciones); %Guardo la tabla con las
posiciones de los impactos en Posiciones_Base.

if strcmp (Tipo,'Base')

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
de llegada para cada sensor
    X_BSA = zeros(8,size(Lista_Nombres,1)); %X_BSA: Entrada Base Sin
Alteraciones

    %Creo la matriz donde se guardarán las posiciones y las intensidades
de cada impacto.
    Y_BSA = zeros(3,size(Lista_Nombres,1)); %Y_BSA: Salida Base Sin
Alteraciones

    for i = 1:size(Lista_Nombres,1)
        %Uso Filtrar_Senales para agregar los valores correspondientes a
a las matrices de entrada y salida.
        [ X_BSA(:,i), Y_BSA(:,i) ] =
Filtrar_Senales(eval(Lista_Nombres{i,1}),Lista_Posiciones,i,Tipo_Busqueda
);
    end

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
de llegada para cada sensor con intensidades normalizadas
    [ X_BIN,Y_BIN] = Normalizar_Fuerza(X_BSA,Y_BSA);

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
de llegada para cada sensor con intensidades normalizadas y tiempos
ponderados
    [ X_BIN_TP, Y_BIN_TP ] = Ponderar_Tiempos(X_BIN,Y_BIN);

    cd(Dir_Bloque); %Abro carpeta donde guardo el bloque.
    %Creo el nombre del bloque que contendrá las matrices de entrada.
    Nombre_Bloque =
strcat('Bloque_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol,'_'
,Tipo_Busqueda);

save(Nombre_Bloque,'X_BSA','Y_BSA','X_BIN','Y_BIN','X_BIN_TP','Y_BIN_TP')
; %Guardo las variables en el Bloque.

```

```

elseif strcmp (Tipo, 'Prueba')

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
    de llegada para cada sensor
    X_PSA = zeros(8,size(Lista_Nombres,1)); %X_BSA: Entrada Base Sin
    Alteraciones

    %Creo la matriz donde se guardarán las posiciones y las intensidades
    de cada impacto.
    Y_PSA = zeros(3,size(Lista_Nombres,1)); %Y_BSA: Salida Base Sin
    Alteraciones

    for i = 1:1:size(Lista_Nombres,1)
        %Uso Filtrar_Senales para agregar los valores correspondientes a
        a las matrices de entrada y salida.
        [ X_PSA(:,i), Y_PSA(:,i)] =
        Filtrar_Senales(eval(Lista_Nombres{i,1}),Lista_Posiciones,i,Tipo_Busqueda
        );

    end

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
    de llegada para cada sensor con intensidades normalizadas y tiempos
    ponderados
    [ X_PTP , Y_PTP ] = Ponderar_Tiempos(X_PSA,Y_PSA);

    cd(Dir_Bloque); %Abro carpeta donde guardo el bloque.
    %Creo el nombre del bloque que contendrá las matrices de salida.
    Nombre_Bloque =
    strcat('Bloque_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol,'_'
    ,Tipo_Busqueda);
    save(Nombre_Bloque,'X_PSA','Y_PSA','X_PTP','Y_PTP'); %Guardo las
    variables en el Bloque.

end

end

```

B.3 FUNCIÓN: NORMALIZAR FUERZAS.

```

function [X_BIN,Y_BIN] = Normalizar_Fuerza(X_BSA,Y_BSA)
% Normalizo el valor fuerzas y amplitudes máximas a 1 N.

```

```

%Creo las matrices para el caso normalizado.
X_BIN_1 = X_BSA;
Y_BIN_1 = Y_BSA;

for i = 1:size(X_BSA,2)
    %Divido los valores de la amplitud máxima por la fuerza
    correspondiente.
    X_BIN_1(1,i) = X_BIN_1(1,i)/Y_BIN_1(3,i);
    X_BIN_1(3,i) = X_BIN_1(3,i)/Y_BIN_1(3,i);
    X_BIN_1(5,i) = X_BIN_1(5,i)/Y_BIN_1(3,i);
    X_BIN_1(7,i) = X_BIN_1(7,i)/Y_BIN_1(3,i);

end

%Fijo todas las fuerzas obtenidas a 1 N.
Y_BIN_1(3,:) = 1;
% =====

% Normalizo el valor fuerzas y amplitudes máximas a 0.1 N.

%Creo las matrices para el caso normalizado.
X_BIN_01 = X_BIN_1;
Y_BIN_01 = Y_BIN_1;

for i = 1:size(X_BSA,2)
    %Multiplico todas las amplitudes máximas por 0.1.
    X_BIN_01(1,i) = X_BIN_01(1,i)*0.1;
    X_BIN_01(3,i) = X_BIN_01(3,i)*0.1;
    X_BIN_01(5,i) = X_BIN_01(5,i)*0.1;
    X_BIN_01(7,i) = X_BIN_01(7,i)*0.1;

end

%Fijo todas las fuerzas obtenidas a 0.1 N.
Y_BIN_01(3,:) = 0.1;

% =====

% =====

% Normalizo el valor fuerzas y amplitudes máximas a 50 N.

%Creo las matrices para el caso normalizado.
X_BIN_50 = X_BIN_1;
Y_BIN_50 = Y_BIN_1;

for i = 1:size(X_BSA,2)
    %Multiplico todas las amplitudes máximas por 50.
    X_BIN_50(1,i) = X_BIN_50(1,i)*50;
    X_BIN_50(3,i) = X_BIN_50(3,i)*50;
    X_BIN_50(5,i) = X_BIN_50(5,i)*50;
    X_BIN_50(7,i) = X_BIN_50(7,i)*50;

```



```

end

%Fijo todas las fuerzas obtenidas a 50 N.
Y_BIN_50(3,:) = 50;

% =====

% Normalizo el valor fuerzas y amplitudes máximas a 100 N.

%Creo las matrices para el caso normalizado.
X_BIN_100 = X_BIN_1;
Y_BIN_100 = Y_BIN_1;

for i = 1:size(X_BSA,2)
    %Multiplico todas las amplitudes máximas por 100.
    X_BIN_100(1,i) = X_BIN_100(1,i)*100;
    X_BIN_100(3,i) = X_BIN_100(3,i)*100;
    X_BIN_100(5,i) = X_BIN_100(5,i)*100;
    X_BIN_100(7,i) = X_BIN_100(7,i)*100;

end

%Fijo todas las fuerzas obtenidas a 100 N.
Y_BIN_100(3,:) = 100;

% =====

% Normalizo el valor fuerzas y amplitudes máximas a 150 N.

%Creo las matrices para el caso normalizado.
X_BIN_150 = X_BIN_1;
Y_BIN_150 = Y_BIN_1;

for i = 1:size(X_BSA,2)
    %Multiplico todas las amplitudes máximas por 150.
    X_BIN_150(1,i) = X_BIN_150(1,i)*150;
    X_BIN_150(3,i) = X_BIN_150(3,i)*150;
    X_BIN_150(5,i) = X_BIN_150(5,i)*150;
    X_BIN_150(7,i) = X_BIN_150(7,i)*150;

end

%Fijo todas las fuerzas obtenidas a 150 N.
Y_BIN_150(3,:) = 150;

% =====

% Normalizo el valor fuerzas y amplitudes máximas a 200 N.

%Creo las matrices para el caso normalizado.
X_BIN_200 = X_BIN_1;
Y_BIN_200 = Y_BIN_1;

```

```

for i = 1:size(X_BSA,2)
    %Multiplico todas las amplitudes máximas por 200.
    X_BIN_200(1,i) = X_BIN_200(1,i)*200;
    X_BIN_200(3,i) = X_BIN_200(3,i)*200;
    X_BIN_200(5,i) = X_BIN_200(5,i)*200;
    X_BIN_200(7,i) = X_BIN_200(7,i)*200;

end

%Fijo todas las fuerzas obtenidas a 200 N.
Y_BIN_200(3,:) = 200;

% =====

% Normalizo el valor fuerzas y amplitudes máximas a 250 N.

%Creo las matrices para el caso normalizado.
X_BIN_250 = X_BIN_1;
Y_BIN_250 = Y_BIN_1;

for i = 1:size(X_BSA,2)
    %Multiplico todas las amplitudes máximas por 250.
    X_BIN_250(1,i) = X_BIN_250(1,i)*250;
    X_BIN_250(3,i) = X_BIN_250(3,i)*250;
    X_BIN_250(5,i) = X_BIN_250(5,i)*250;
    X_BIN_250(7,i) = X_BIN_250(7,i)*250;

end

%Fijo todas las fuerzas obtenidas a 250 N.
Y_BIN_250(3,:) = 250;

X_BIN = [X_BIN_01,X_BIN_1,X_BIN_50
,X_BIN_100,X_BIN_150,X_BIN_200,X_BIN_250,X_BSA];
Y_BIN = [Y_BIN_01,Y_BIN_1,Y_BIN_50
,Y_BIN_100,Y_BIN_150,Y_BIN_200,Y_BIN_250,Y_BSA];

end

```

B.4 FUNCIÓN: PONDERAR TIEMPOS.

```

function [X_TP,Y_TP] = Ponderar_Tiempos(X_IN,Y_IN)

X_TP = X_IN;
Y_TP = Y_IN;

for i = 1:size(X_IN,2)
    X_TP(2,i) = X_TP(2,i)*100000;
    X_TP(4,i) = X_TP(4,i)*100000;

```

```

X_TP(6,i) = X_TP(6,i)*100000;
X_TP(8,i) = X_TP(8,i)*100000;

```

```
end
```

```
end
```

B.5 FUNCIÓN: EVALUAR BASE VECINOS.

```

function [Y_Est,Error_A,Error_F,gamma] =
Evaluuar_Base_Vecinos(X_B,Y_B,X_P,Y_P,max)
Y_Est = zeros(size(Y_P,1),size(Y_P,2),max);
Error_A = size(1,max);
Error_F = size(1,max);
gamma = size(1,max);

for n_vecinos=1:max
    for i=1:size(X_P,2)
        gamma(n_vecinos)=gammanb(X_P(:,i),X_B,n_vecinos);
        [phi,contribute] = lme_damage(X_P(:,i),X_B,gamma(n_vecinos));
        Y_Est(:,i,n_vecinos) = Y_B(:,contribute)*phi;
    end

    Diff = abs(Y_Est(:,:,n_vecinos)-Y_P);

    %fprintf(' Its all about forward motion.\n Doesnt matter what
breaks,catches fire or falls over. \n Get up.\n Eat fire.\n Step over
debris.\n Keep moving.\n .-Warren Ellis\n')

    %Promedios de Error para los tres parámetros
    Error_A(n_vecinos) = mean(Diff(1,:))*mean(Diff(2,:))/(490*390)*100;

    Error_F(n_vecinos) = mean(Diff(3,:)./Y_Est(3,:,n_vecinos))*100;

end
X = 1:max;

figure(1)
set(gca,'FontSize',13)
plot(X,Error_A,'-ob');
hold on
plot(X,Error_F,'-or');
legend('Error de Área', 'Error de Fuerza')
ylabel('Error [%]')
xlabel('Número de vecinos')

figure (2)

```

```

set(gca,'FontSize',13)
plot(X,gamma,'-ob');
ylabel('Gamma')
xlabel('Número de vecinos')

```

```
end
```

B.6 FUNCIÓN EVALUAR BASE.

```

function [Y_Est] = Evaluar_Base(X_B,Y_B,X_P,Y_P,n_vecinos)
Y_Est = zeros(size(Y_P));

for i=1:size(X_P,2)
    gamma=gammanb(X_P(:,i),X_B,n_vecinos);
    [phi,contribute] = lme_damage(X_P(:,i),X_B,gamma);
    Y_Est(:,i) = Y_B(:,contribute)*phi;
end

Diff = abs(Y_Est-Y_P);
fprintf(' Its all about forward motion.\n Doesnt matter what
breaks,catches fire or falls over. \n Get up.\n Eat fire.\n Step over
debris.\n Keep moving.\n .-Warren Ellis\n')

%Promedios de Error para los tres parámetros
prom_x = mean(Diff(1,:))/490*100;
prom_y = mean(Diff(2,:))/390*100;
Error_A = mean(Diff(1,:))*mean(Diff(2,:))/(490*390)*100;

prom_f = mean(Diff(3,:)./Y_Est(3,:))*100;

display(strcat('El error promedio de la coordenada x es : ',
num2str(prom_x),'%'))
display(strcat('El error promedio de la coordenada y es : ',
num2str(prom_y),'%'))
display(strcat('El error promedio de area es : ', num2str(Error_A),'%'))
display(strcat('El error promedio de la fuerza es : ',
num2str(prom_f),'%'))

%Lineas entre posiciones estimadas y error.
xl = [Y_P(1,:); Y_Est(1,:)];
yl = [Y_P(2,:); Y_Est(2,:)];

% Ind_num = (1:60)';
% Ind_str = num2str(Ind_num);
% Ind_cell = cellstr(Ind_str);

```

```

figure(1)
scatter(Y_P(1,:),Y_P(2,:));
hold on
scatter(Y_Est(1,:),Y_Est(2,:), 'x');
hold on
plot(x1,y1)
% hold on
% scatter(Y_B(1,:),Y_B(2,:), 'd');
% hold on
% text(Y_P(1,:),Y_P(2,:), Ind_cell,
'VerticalAlignment','bottom','HorizontalAlignment','right')
axis([0 500 0 390])
xlabel('Coordenada X [mm]');
ylabel('Coordenada Y [mm]');
legend('Prueba', 'Estimado
PME', 'Location', 'northoutside', 'Orientation', 'horizontal')

% nbins1 = 0:10:200;
% nbins2 = 0:10:200;
% nbins3 = 0:10:200;

figure(2)
hist(Diff(1,:));
% hist(Diff_pctj(1,:),nbins1);
axis tight
title('Histograma del porcentaje error en la coordenada x')
xlabel('Porcentaje de error [%]')
ylabel('Frecuencia')

figure(3)
hist(Diff(2,:));
% hist(Diff_pctj(2,:),nbins2);
axis tight
title('Histograma del porcentaje error en la coordenada y')
xlabel('Porcentaje de error [%]')
ylabel('Frecuencia')

figure(4)
hist(Diff(3,:));
% hist(Diff_pctj(3,:),nbins3);
axis tight
title('Histograma del porcentaje error en la intensidad de la fuerza')
xlabel('Porcentaje de error [%]')
ylabel('Frecuencia')

figure(5)
plot(Y_P(1,:), '-k');
hold on
plot(Y_Est(1,:), '--r');
legend('Prueba', 'Estimado
PME', 'Location', 'northoutside', 'Orientation', 'horizontal')
xlabel('Set de datos')
ylabel('Coordenada X [mm]')

figure(6)
plot(Y_P(2,:), '-k');

```

```

hold on
plot(Y_Est(2,:), '--r');
legend('Prueba', 'Estimado
PME', 'Location', 'northoutside', 'Orientation', 'horizontal')
xlabel('Set de datos')
ylabel('Coordenada Y [mm]')

figure(7)
plot(Y_P(3,:), '-k');
hold on
plot(Y_Est(3,:), '--r');
legend('Prueba', 'Estimado
PME', 'Location', 'northoutside', 'Orientation', 'horizontal')
xlabel('Set de datos')
ylabel('Amplitud de la Fuerza [N]')

end

```

B.7 PORCENTAJE ÓPTIMO.

```

close all
clear all
clc

Dir_Caja = 'C:\Users\Nicolás\Documents\Datos Memoria\Cajas Datos';
Dir_Bloque = 'C:\Users\Nicolás\Dropbox\Dossier-Bachmann\Bloques
Porcentajes';
n_vecinos = 16;
j = 1;
Pctjes = 0.0125:0.0125:0.95;
Y_Est = zeros(3,60,size(Pctjes,2));
Error_A = zeros(1,size(Pctjes,2));
Error_F = zeros(1,size(Pctjes,2));

for i = Pctjes
    Caja_Madre_Pctj('Base',24000,[],[],Dir_Caja,Dir_Bloque,i);
    Caja_Madre_Pctj('Prueba',24000,[],[],Dir_Caja,Dir_Bloque,i);

    cd(Dir_Bloque)
    load Bloque_Base_24000_FM
    load Bloque_Prueba_24000_FM

    [Y_Est(:, :, j), Error_A(j), Error_F(j)] =
    Evaluar_Base_Silente(X_BIN_TP, Y_BIN_TP, X_PTP, Y_PTP, n_vecinos);
    j = j+1;
end

```

```

Pctjes = Pctjes*100;
Dir_Bloque = 'C:\Users\Nicolás\Dropbox\Dossier-Bachmann\Bloques
Porcentajes';
cd(Dir_Bloque)

save('Porcentajes_Error.mat','Pctjes','Error_A','Error_F')

Dir_Bloque = 'C:\Users\Nicolás\Dropbox\Dossier-Bachmann\Bloques
Porcentajes';
cd(Dir_Bloque)
load Porcentajes_Error

plot(Pctjes,Error_A,'r')
hold on
plot(Pctjes,Error_F,'b')
hold on
legend('Error de Área', 'Error de Fuerza')
ylabel('Error [%]')
xlabel('Porcentaje de la amplitud máxima aceptable [%]')

```

B.8 FUNCIÓN: CAJA MADRE PORCENTAJE.

```

%::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
%::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

```

%En el archivo 'Bloque_Base.mat' aparecen las siguientes Bases de datos:

```

%X_BSA: Entrada Base Sin Alteraciones
%Y_BSA: Salida Base Sin Alteraciones
%X_BIN: Entrada Base Intensidades Normalizadas
%Y_BIN: Salida Base Intensidades Normalizadas
%X_BIN_TP: Entrada Base Intensidades Normalizadas y Tiempos Ponderados
%Y_BIN_TP: Salida Base Intensidades Normalizadas y Tiempos Ponderados

```

```

%::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
%::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

```

%En el archivo 'Bloque_Prueba.mat' aparecen las siguientes Set de Pruebas:

```

%X_PSA: Entrada Prueba Sin Alteraciones
%Y_PSA: Salida Prueba Sin Alteraciones
%X_PTP: Entrada Prueba con Tiempos Ponderados
%Y_PTP: Salida Prueba con Tiempos Ponderados

```

```

%::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
%::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

```

```

function
Caja_Madre_Pctj(Tipo,Frecuencia_Muestreo,Interpolante,Tipo_Interpolacion,
Dir_Caja,Dir_Bloque,Pctj)

cd(Dir_Caja) %Abro la carpeta donde se encuentran la caja que que se
usara para crear las matrices de ingreso.

%Compruebo si el usuario ingresó valores de Interpolación.
if ~isempty(Interpolante) && ~isempty(Tipo_Interpolacion)
    Interpol = strcat('_x',num2str(Interpolante),'_',Tipo_Interpolacion);
% Contruyo las siglas correspondientes de la interpolación.
else
    Interpol = ''; %Dejo el valor como un elemento vacio.
end

%Recreo el nombre de la caja que contiene las tablas con los impactos
Nombre_Caja =
strcat('Caja_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol);

load(Nombre_Caja) %cargo la caja que contiene los impactos deseados.

%Recreo el nombre de la celda que contiene los nombres de todos los
elementos de la caja.
Celda_Nombres =
strcat('Nombres_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol);
%Recreo el nombre de la tabla que contiene las posiciones de todos los
impactos.
Tabla_Posiciones =
strcat('Posiciones_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol
);

Lista_Nombres = eval(Celda_Nombres); %Guardo la celda con lista de
nombres de la caja en Nombres_Base.
Lista_Posiciones = eval(Tabla_Posiciones); %Guardo la tabla con las
posiciones de los impactos en Posiciones_Base.

if strcmp (Tipo,'Base')

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
de llegada para cada sensor
    X_BSA = zeros(8,size(Lista_Nombres,1)); %X_BSA: Entrada Base Sin
Alteraciones

    %Creo la matriz donde se guardarán las posiciones y las intensidades
de cada impacto.
    Y_BSA = zeros(3,size(Lista_Nombres,1)); %Y_BSA: Salida Base Sin
Alteraciones

    for i = 1:size(Lista_Nombres,1)
        %Uso Filtrar_Senales para agregar los valores correspondientes a
a las matrices de entrada y salida.
        [ X_BSA(:,i), Y_BSA(:,i) ] =
Filtrar_Senales_Pctj(eval(Lista_Nombres{i,1}),Lista_Posiciones,i,Pctj);
    end
end

```



```

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
de llegada para cada sensor con intensidades normalizadas
    [ X_BIN,Y_BIN] = Normalizar_Fuerza(X_BSA,Y_BSA);

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
de llegada para cada sensor con intensidades normalizadas y tiempos
ponderados
    [ X_BIN_TP, Y_BIN_TP ] = Ponderar_Tiempos(X_BIN,Y_BIN);

    cd(Dir_Bloque); %Abro carpeta donde guardo el bloque.
    %Creo el nombre del bloque que contendrá las matrices de entrada.
    Nombre_Bloque =
strcat('Bloque_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol);

save(Nombre_Bloque,'X_BSA','Y_BSA','X_BIN','Y_BIN','X_BIN_TP','Y_BIN_TP')
; %Guardo las variables en el Bloque.

elseif strcmp (Tipo,'Prueba')

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
de llegada para cada sensor
    X_PSA = zeros(8,size(Lista_Nombres,1)); %X_BSA: Entrada Base Sin
Alteraciones

    %Creo la matriz donde se guardarán las posiciones y las intensidades
de cada impacto.
    Y_PSA = zeros(3,size(Lista_Nombres,1)); %Y_BSA: Salida Base Sin
Alteraciones

    for i = 1:1:size(Lista_Nombres,1)
        %Uso Filtrar_Senales para agregar los valores correspondientes a
a las matrices de entrada y salida.
        [ X_PSA(:,i), Y_PSA(:,i)] =
Filtrar_Senales_Pctj(eval(Lista_Nombres{i,1}),Lista_Posiciones,i,Pctj);

    end

    %Creo la matriz donde se guardarán las amplitudes máximas y tiempos
de llegada para cada sensor con intensidades normalizadas y tiempos
ponderados
    [ X_PTP , Y_PTP ] = Ponderar_Tiempos(X_PSA,Y_PSA);

    cd(Dir_Bloque); %Abro carpeta donde guardo el bloque.
    %Creo el nombre del bloque que contendrá las matrices de salida.
    Nombre_Bloque =
strcat('Bloque_',Tipo,'_',num2str(Frecuencia_Muestreo),'_FM',Interpol);
    save(Nombre_Bloque,'X_PSA','Y_PSA','X_PTP','Y_PTP'); %Guardo las
variables en el Bloque.

```

end

end

B.9 FUNCIÓN: FILTRAR SEÑALES PORCENTAJE.

```
function [Entrada,Salida] =
Filtrar_Senales_Pctj (Impacto,Posiciones,Numero,Pctj)
% Filtrar recibe la tabla de impacto(que contiene la fuerza y las
% deformaciones en el tiempo),la tabla de las pociones de los impactos y
el
% número correspondiente al impacto, entregando una matriz con las
% las amplitudes y los tiempos de llegada para cada sensor y también
entrega
% una matriz con la la posición del impacto en X e Y, cómo la fuerza del
% mismo.
% Entrada =
[A_Sensor_1;T_Sensor_1;A_Sensor_2;T_Sensor_2;A_Sensor_3;T_Sensor_3;A_Sens
or_4;T_Sensor_4];
% Salida = [Posiciones.X(Numero);Posiciones.Y(Numero);A_Fuerza ];

[A_Fuerza,I_Fuerza] = max(Impacto.Fuerza); %A_Fuerza: Amplitud máxima de
la fuerza de impacto en [N]; I_Fuerza: Inídice de A_Fuerza.
T_Impacto = Impacto.Tiempo(I_Fuerza); %Tiempo en que ocurre el impacto.

A_Sensor_1 = max(Impacto.Sensor_1); %A_Sensor_1:Deformación máxima
obtenida por el sensor 1.
[Peaks_Sensor_1,I_Sensor_1] =
findpeaks (Impacto.Sensor_1, 'MinPeakHeight',A_Sensor_1*Pctj);
T_Sensor_1 = Impacto.Tiempo(I_Sensor_1(1)) - T_Impacto; %Tiempo en que
demora en llegar el impacto a sensor 1.

A_Sensor_2 = max(Impacto.Sensor_2); %A_Sensor_2:Deformación máxima
obtenida por el sensor 2.
[Peaks_Sensor_2,I_Sensor_2] =
findpeaks (Impacto.Sensor_2, 'MinPeakHeight',A_Sensor_2*Pctj);
T_Sensor_2 = Impacto.Tiempo(I_Sensor_2(1)) - T_Impacto; %Tiempo en que
demora en llegar el impacto a sensor 2.

A_Sensor_3 = max(Impacto.Sensor_3); %A_Sensor_3:Deformación máxima
obtenida por el sensor 3.
[Peaks_Sensor_3,I_Sensor_3] =
findpeaks (Impacto.Sensor_3, 'MinPeakHeight',A_Sensor_3*Pctj);
T_Sensor_3 = Impacto.Tiempo(I_Sensor_3(1)) - T_Impacto; %Tiempo en que
demora en llegar el impacto a sensor 3.

A_Sensor_4 = max(Impacto.Sensor_4); %A_Sensor_4:Deformación máxima
obtenida por el sensor 4.
```

```

[Peaks_Sensor_4,I_Sensor_4] =
findpeaks(Impacto.Sensor_4, 'MinPeakHeight',A_Sensor_4*Pctj);
T_Sensor_4 = Impacto.Tiempo(I_Sensor_4(1)) - T_Impacto; %Tiempo en que
demora en llegar el impacto a sensor 4.

Entrada =
[A_Sensor_1;T_Sensor_1;A_Sensor_2;T_Sensor_2;A_Sensor_3;T_Sensor_3;A_Sens
or_4;T_Sensor_4];
Salida = [Posiciones.X(Numero);Posiciones.Y(Numero);A_Fuerza ];

end

```

B.10 FUNCIÓN: EVALUAR BASE SILENTE.

```

function [Y_Est,Error_A,Error_F] =
Evaluar_Base_Silente(X_B,Y_B,X_P,Y_P,n_vecinos)
Y_Est = zeros(size(Y_P));

for i=1:size(X_P,2)
    gamma=gammanb(X_P(:,i),X_B,n_vecinos);
    [phi,contribute] = lme_damage(X_P(:,i),X_B,gamma);
    Y_Est(:,i) = Y_B(:,contribute)*phi;
end

Diff = abs(Y_Est-Y_P);

%fprintf(' Its all about forward motion.\n Doesnt matter what
breaks,catches fire or falls over. \n Get up.\n Eat fire.\n Step over
debris.\n Keep moving.\n .-Warren Ellis\n')

%Promedios de Error para los tres parámetros

Error_A = mean(Diff(1,:))*mean(Diff(2,:))/(490*390)*100;

Error_F = mean(Diff(3,:)./Y_Est(3,:))*100;

end

```

C. RESULTADOS DE BSA-FP Y BIN – FP.

C.1 RESULTADOS DE BSA – FP.

Tabla C.1 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BSA-FP.

Característica	Valor	Unidad
Error promedio coordenada x.	18.64	[%]
Error promedio coordenada y.	18.64	[%]
Error promedio de área.	3.48	[%]
Error promedio de la fuerza F	15.58	[%]

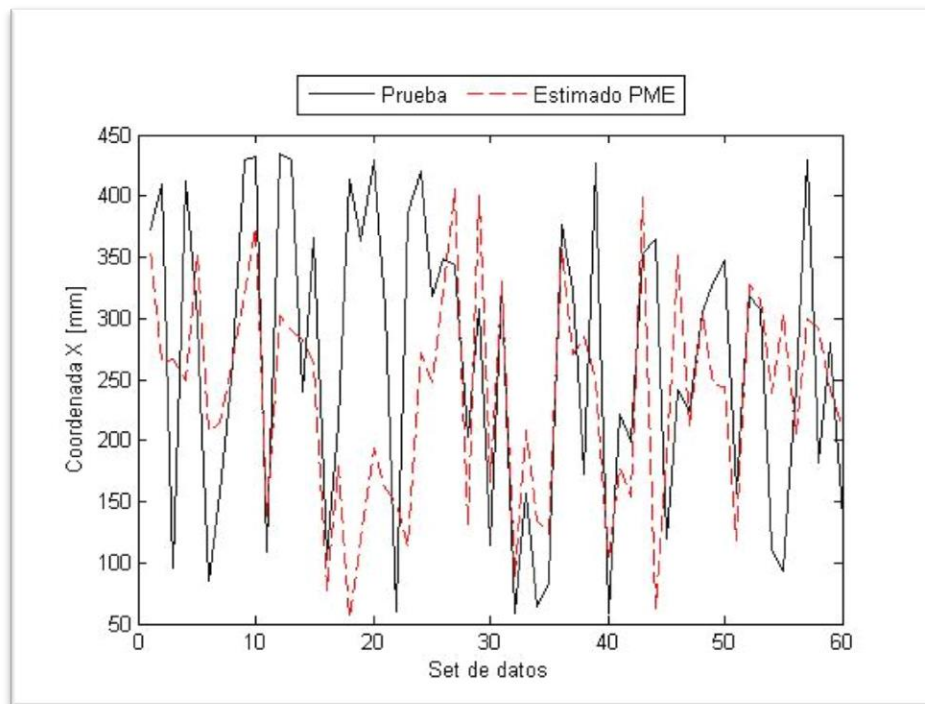


Figura C.1 Coordenada X experimental y estimada con BSA-FP.

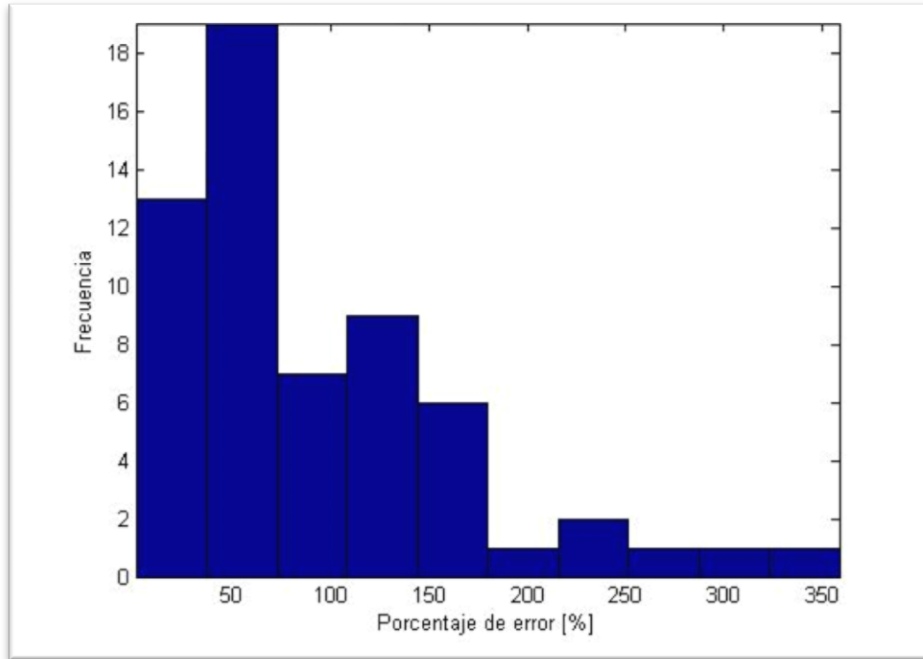


Figura C.2 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada x para el caso BSA-FP.

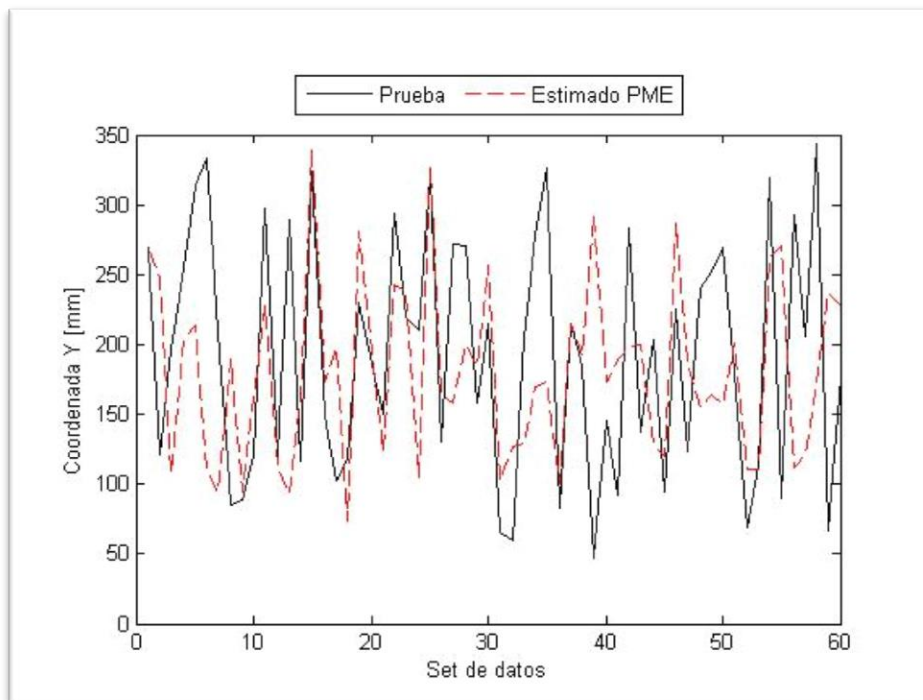


Figura C.3 Coordenada Y experimental y estimada con BSA-FP.

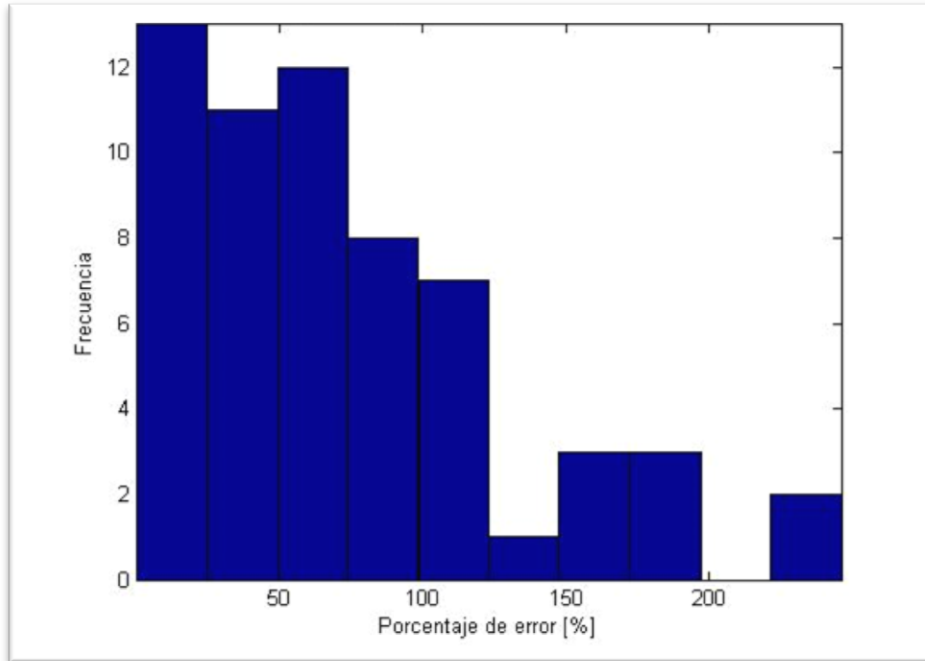


Figura C.4 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BSA-FP.

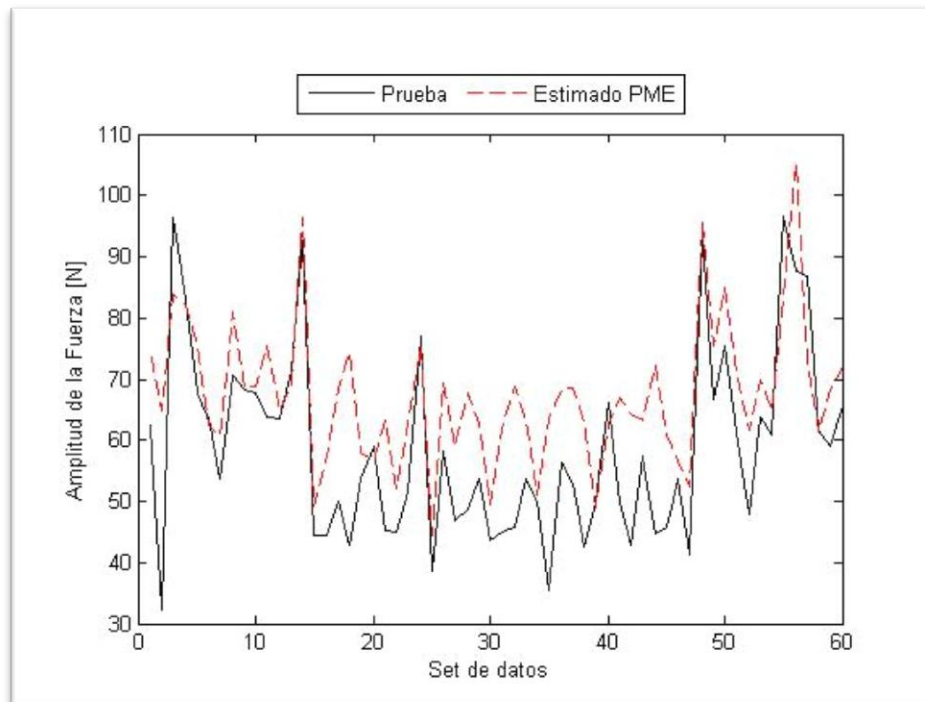


Figura C.5 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BSA-FP.

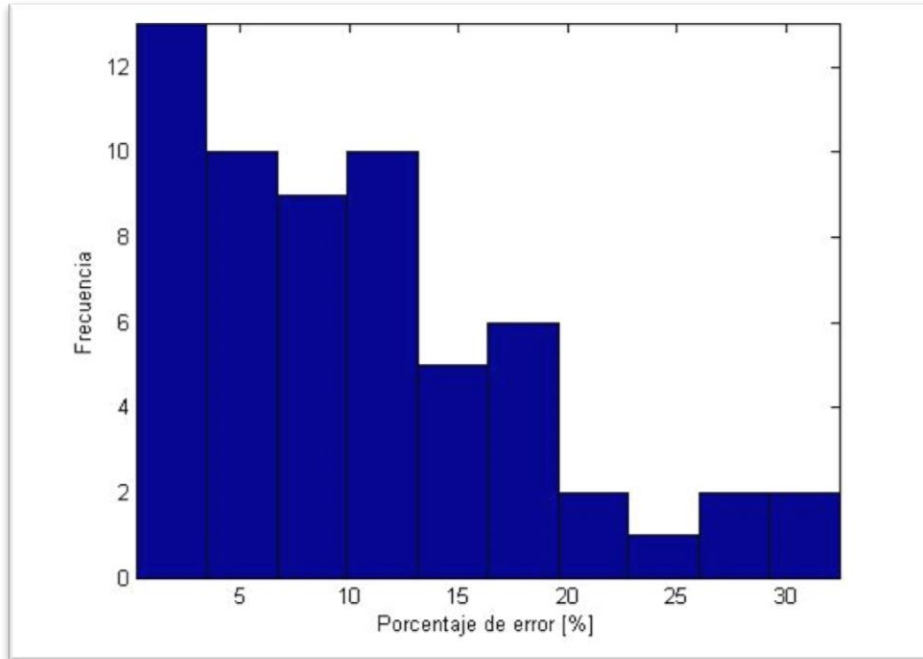


Figura C.6 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BSA-FP.

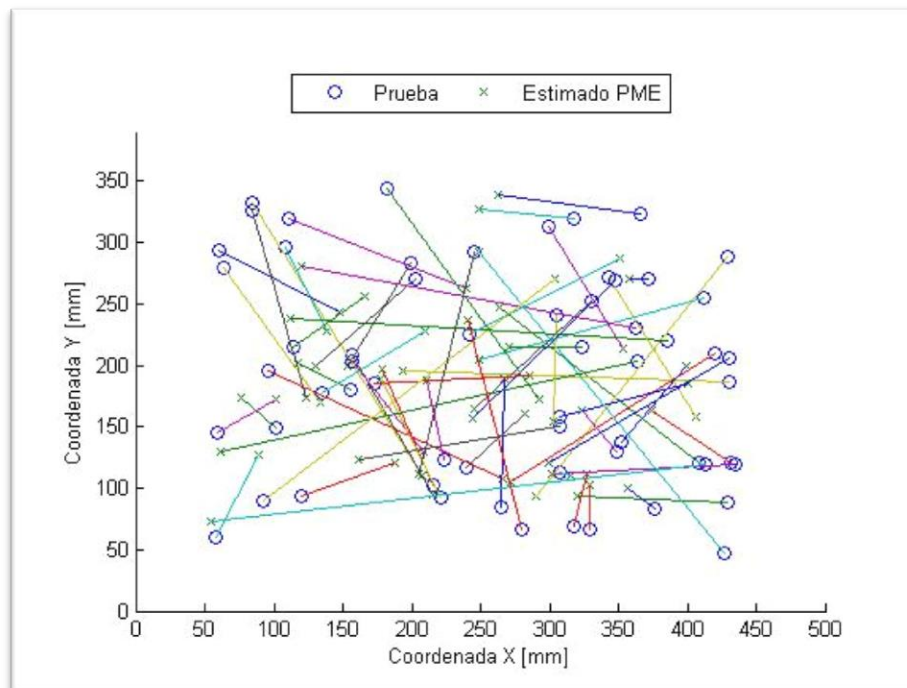


Figura C.7 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BSA-FP.

C.2 RESULTADOS BIN – FP.

Tabla C.2 Resumen de los resultados obtenidos para el caso BIN-FP.

Característica	Valor	Unidad
Error promedio coordenada x.	16.11	[%]
Error promedio coordenada y.	18.27	[%]
Error promedio de área.	2.94	[%]
Error promedio de la fuerza F	13.32	[%]

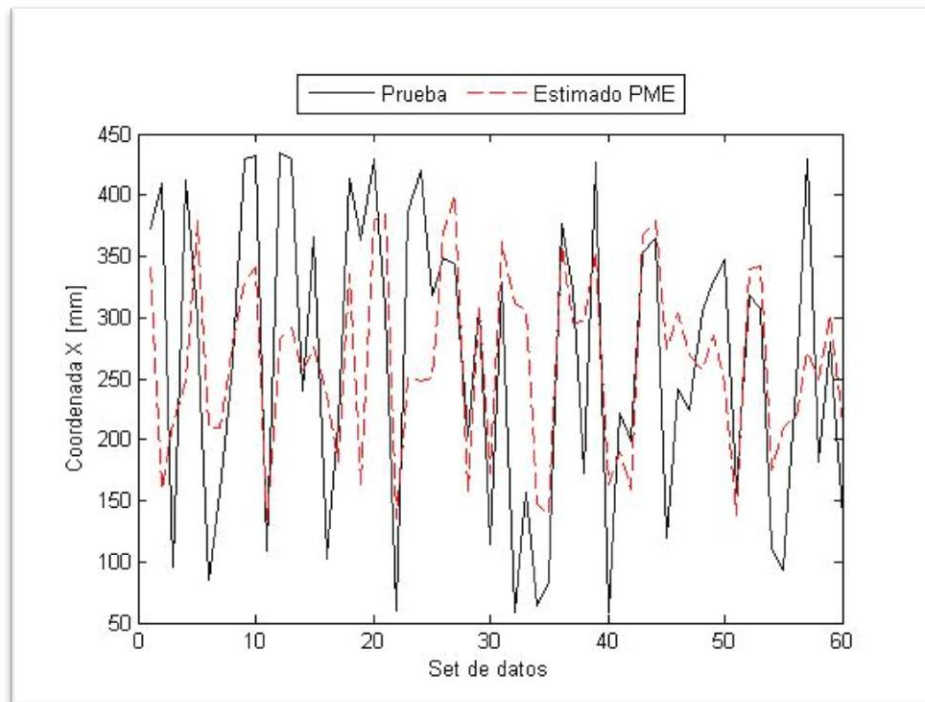


Figura C.8 Coordenada X experimental y estimada con BIN-FP.

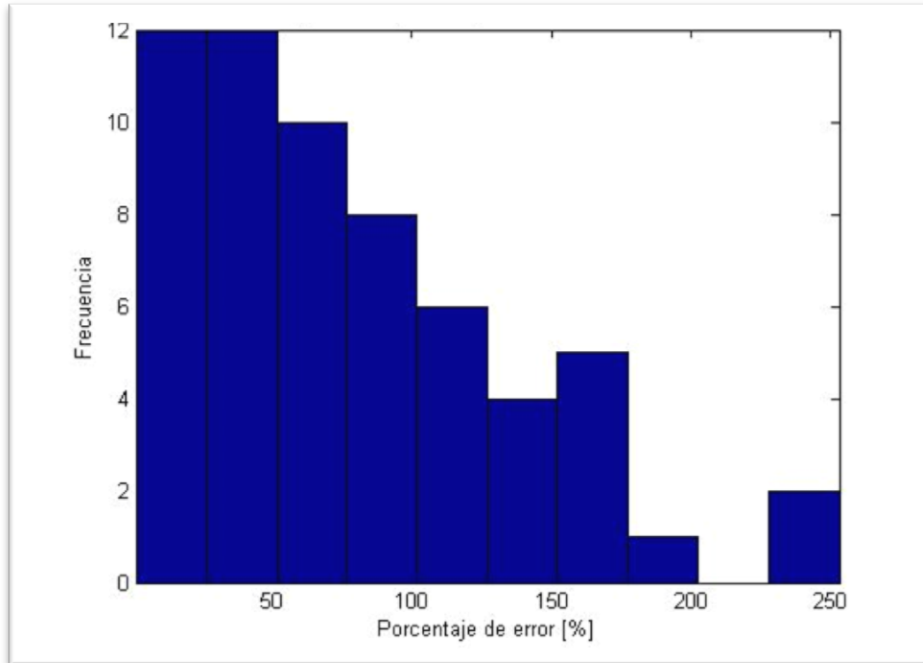


Figura C.9 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada X para el caso BIN-FP.

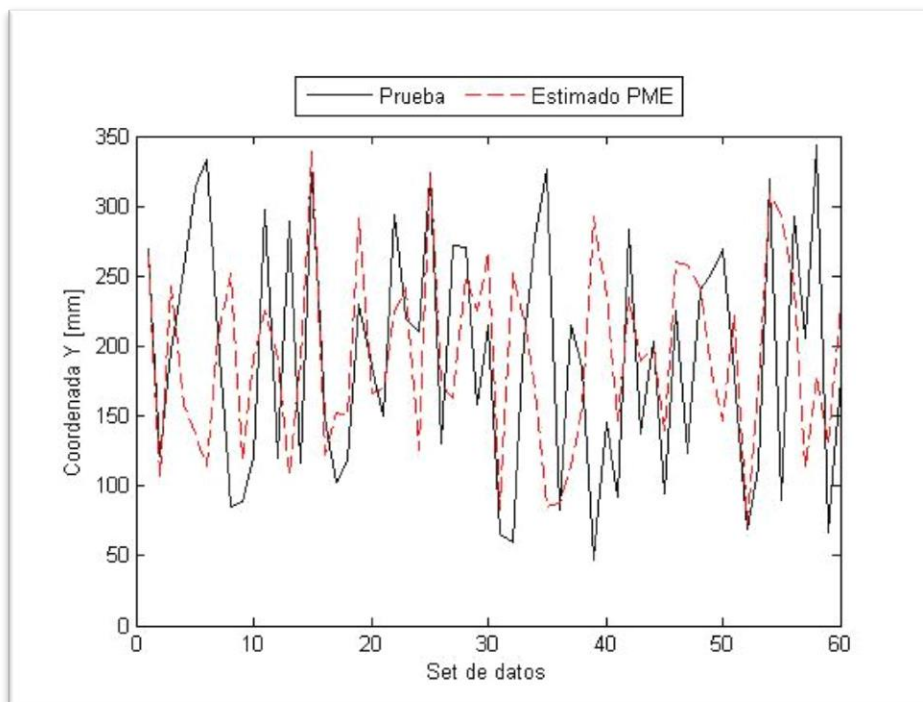


Figura C.10 Coordenada Y experimental y estimada con BIN-FP.

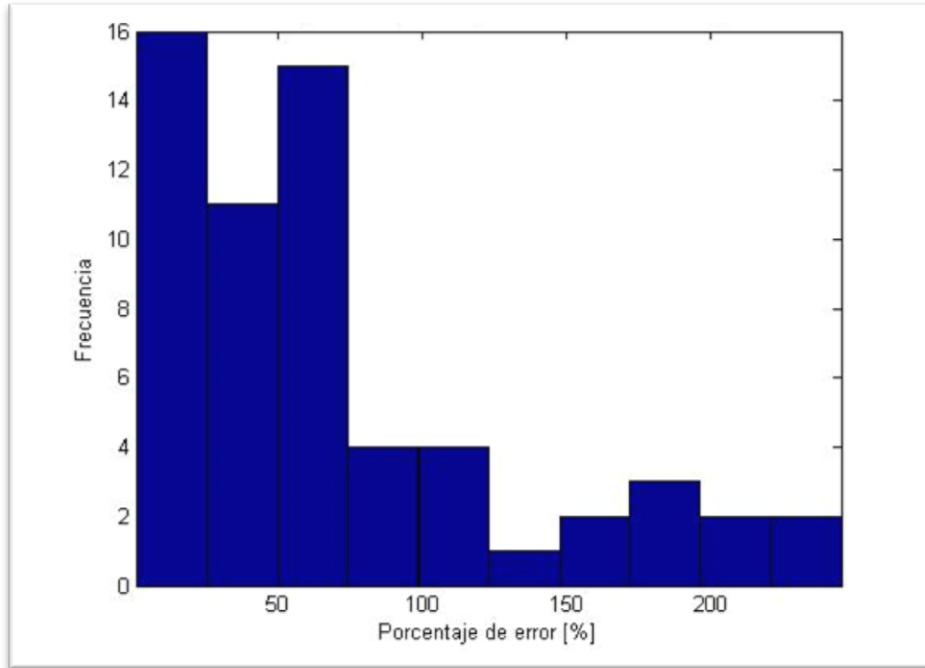


Figura C.11 Histograma de la frecuencia de errores para la coordenada y para el caso BIN-FP.

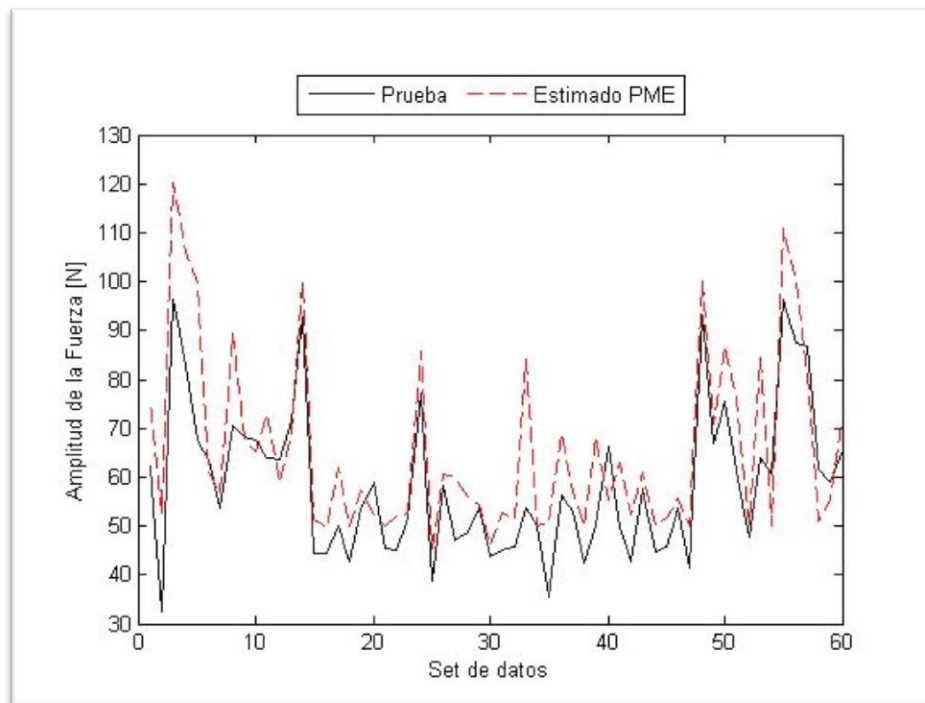


Figura C.12 Amplitud de la Fuerza experimental y estimada con BIN-FP.

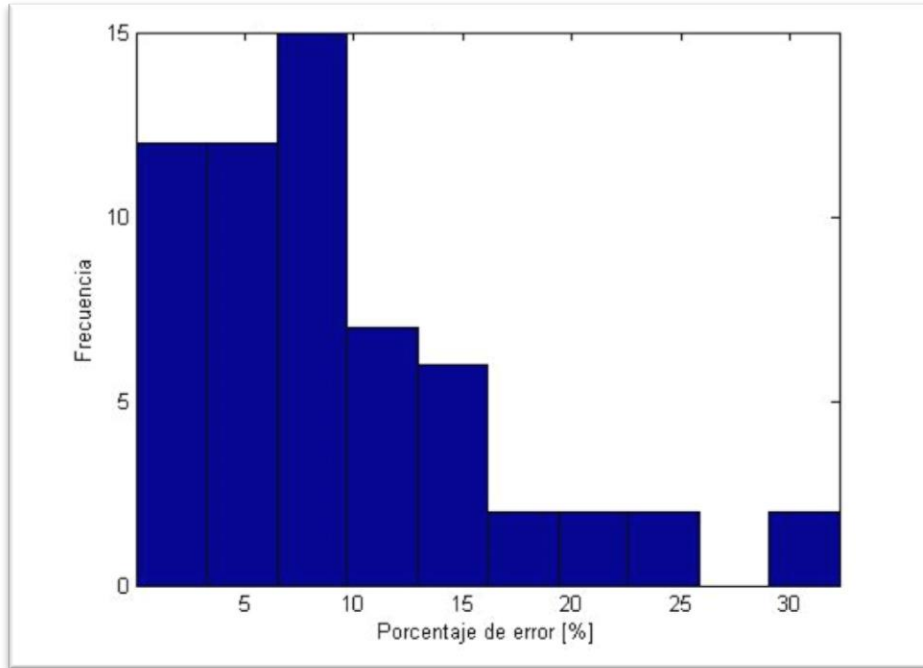


Figura C.13 Histograma de la frecuencia de errores de la fuerza F para BIN-FP.

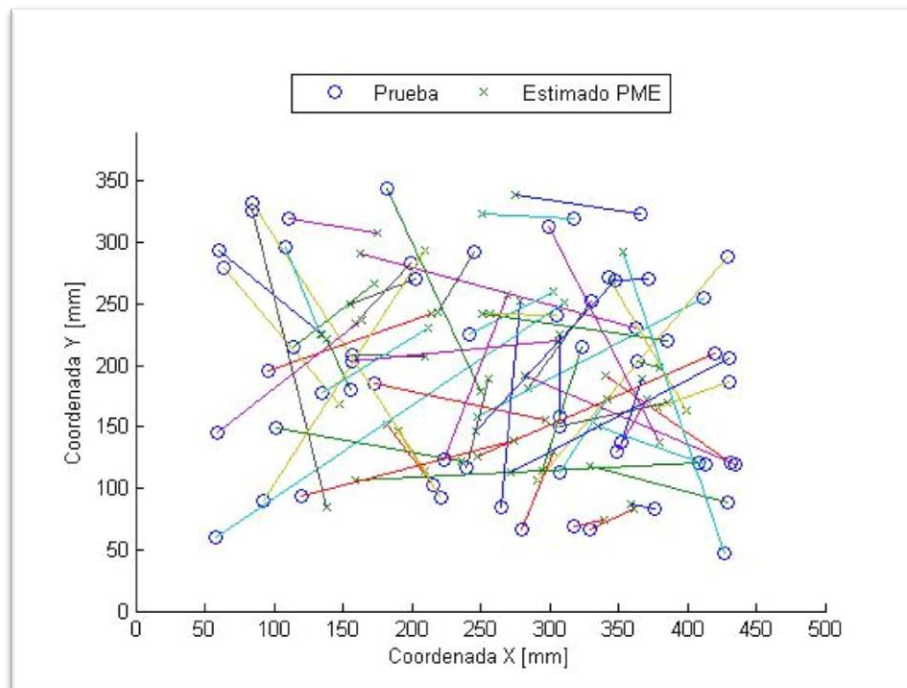


Figura C.14 Comparación de la localización de los impactos en la placa para BIN-FP.