



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA FÍSICA Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MODALES VARIABLES EN EL
TIEMPO EMPLEANDO TÉCNICAS BAYESIANAS Y DE
NEWTON-RAPHSON A PARTIR DE REGISTROS SÍSMICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLÁS DROPPELMANN TAVELLI

PROFESOR GUÍA

FRANCISCO JAVIER HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
FABIAN RODOLFO ROJAS BARRALES
RODRIGO ASTROZA EULUFÍ

SANTIAGO DE CHILE

2020

Resumen

Usualmente, la modelación de la respuesta sísmica de estructuras es realizada considerando un modelo lineal-elástico en donde se supone que las propiedades dinámicas (frecuencias naturales, formas modales y tasas de amortiguamiento) son invariables en el tiempo. Sin embargo, se ha comprobado que los parámetros modales en estructuras instrumentadas y sujetas a cargas sísmicas pueden variar significativamente durante el tiempo debido a efectos no-lineales que pueden ser atribuidos ya sea a daño de la estructura y/o a otros factores de difícil modelación como son la variación de sus tasas de amortiguamiento debido a la interacción no-lineal con el aire, el suelo y/o con otros elementos no-estructurales. Esto no significa necesariamente una degradación estructural propiamente tal, sino que corresponde a un comportamiento normal que la estructura experimenta durante eventos sísmicos.

El edificio BNCS de san Diego fue densamente instrumentado y ensayado en mesa vibradora justamente con el propósito de estudiar el comportamiento durante eventos sísmicos y cuenta con registros de varios eventos de mediana a alta intensidad. Como resultado, se espera generar una rutina en el programa MATLAB que permita estimar como cambian los parámetros dinámicos (frecuencias, razones de amortiguamiento y formas modales) en el tiempo a través del ajuste de un modelo modal no-lineal con la respuesta medida, cuando el edificio se ve sujeto a movimientos sísmicos. En este contexto, el ajuste de los parámetros dinámicos se realizará con técnicas Bayesianas, las cuales son metodologías que han sido introducidas en el tópico de identificación estructural hace corto tiempo mostrando resultados alentadores. A diferencia de lo realizado en el estado del arte, no se busca calibrar parámetros de modelos de elementos finitos (como se realiza con métodos Bayesianos) sino que se estimará directamente las propiedades dinámicas de la estructura. Para identificar la variación temporal de las propiedades dinámicas se utilizarán métodos Bayesianos que ajusten los parámetros modales por pequeñas y/o medianas ventanas de tiempo.

Complementariamente el ajuste de las propiedades modales se realizará a través de métodos de optimización con Newton-Raphson de forma complementaria a la estimación Bayesiana con el fin de obtener parámetros lo más cercanos a la realidad. En este contexto se observará que la optimización de N-R presenta resultados más alentadores.

Agradecimientos

Primero, agradecer a mis amigos cercanos que siempre han estado presentes, sin importar las circunstancias. Tanto los que conozco de toda la vida como los que conocí durante los últimos años.

Agradezco también a Francisco H, mi profesor guía, quien siempre tuvo la mejor disposición para llevar adelante este trabajo de título.

También, una mención especial para todos las funcionarias y funcionarios de la universidad por su trabajo dedicado y comprometido con la Universidad.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Introducción general	1
1.2	Motivación	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Objetivos Generales	4
1.3.2	Objetivos específicos	4
1.4	Resultados esperados	4
2	Marco Teórico	5
2.1	DSI por pequeñas ventanas	8
2.2	Filtro de Kalman (UKF)	11
3	Algoritmo de optimización de parámetros dinámicos utilizando filtro de Kalman (UKF).....	14
3.1	Esquema general funcionamiento algoritmo	18
4	Algoritmo de optimización mediante Newton-Raphson	20
5	Análisis modelo teórico.....	22
6	Descripción estructura en estudio Edificio BNCS – Universidad de California, San Diego	33
6.1	Datos Generales.....	33
6.2	Aisladores Sísmicos.....	35
6.3	Instrumentación.....	36
6.4	Protocolo de ensayos	37
7	Análisis de resultados	38
7.1	Registro aceleraciones.....	38
7.2	Definición de frecuencias, amortiguamiento y formas modales iniciales.....	43
7.2.1	Frecuencias fundamentales iniciales.....	43
7.2.2	Formas modales iniciales	44
7.3	Definición de covarianza y parámetros fijos de optimización.....	46
7.4	PSD de mediciones	49

7.5	Respuesta.....	51
7.6	Variación en el tiempo de los parámetros normalizados	55
7.7	Frecuencias	59
7.7.1	Frecuencias fundamentales	59
7.7.2	Frecuencias identificadas con filtro de Kalman	59
7.7.3	Función de transferencia por pequeñas ventanas Caso base fija	64
7.7.4	Transferectograma pequeñas ventanas Caso base Aislada	66
7.8	Aceleración modal.....	67
7.9	Tasas de amortiguamiento utilizando UKF	69
7.10	Formas modales.....	73
7.10.1	Variación MAC acumulado	75
8	Optimización mediante Newton Raphson	78
8.1	Ajuste amortiguamiento mediante N-R y método peak-picking	78
8.2	Ajuste de frecuencias y tasas de amortiguamiento mediante Newton-Raphson	82
9	Conclusiones generales.....	86
9.1	Frecuencias	86
9.2	Amortiguamiento.....	86
9.3	Formas modales.....	87
9.4	Aceleraciones modales	87
10	Bibliografía.....	93
11	Anexos.....	94
11.1	Anexo: Registro aceleraciones por canal casos base fija	94
11.2	Anexo: Registro aceleraciones por canal casos base aislada	97
11.3	Anexo: Covarianza utilizada registros base fija.....	99
11.4	Anexo: Covarianza utilizada registros base aislada	100
11.5	Anexo: Respuestas Calculadas UKF caso base fija	101
11.6	Anexo: Caso respuestas calculadas UKF caso base aislada.....	104
11.7	Anexo: PSD Casos Base fija.....	107
11.8	Anexo: PSD casos Base aislada	110

11.9	Anexo: Frecuencias y transferectogramas casos base fija.....	111
11.10	Anexo: Frecuencias y transferectogramas casos base aislada.....	115
11.11	Anexo: Variación parámetros normalizados.....	118
11.11.1	Caso ICA50 FB.....	118
11.11.2	Anexo: Caso ICA100 FB.....	121
11.11.3	Anexo: Caso DEN100 FB.....	124
11.11.4	Anexo: Caso ICA50 BI.....	127
11.11.5	Anexo: Caso ICA100 BI.....	129
11.11.6	Anexo: Caso ICA140 BI.....	131
11.11.7	Anexo: Caso ICA140 BI.....	133
11.12	Anexo: Amortiguamientos calculados caso base fija (UKF y N-R).....	135
11.13	Anexo: Amortiguamientos calculados caso base aislada (UKF Y N-R)...	139
11.14	Anexo: MAC caso base fija.....	142
11.15	Anexo: MAC caso base aislada.....	145
11.16	Anexo: Respuesta y amortiguamientos Newton Raphson.....	149
11.16.1	Anexo: Respuesta.....	149
11.16.2	Anexo: Amortiguamiento.....	157

Índice de tablas

Tabla 5-1: Parámetros invariantes modelo teórico	22
Tabla 6-1: Orden cronológico de ensayos sísmicos.....	37
Tabla 7-1: Canales utilizados caso base fija.....	38
Tabla 7-2: Canales utilizados base aislada.....	38
Tabla 7-3: Frecuencias identificada DSI pequeñas ventanas casos base fija.....	43
Tabla 7-4: Frecuencias identificadas casos base aislada.....	43
Tabla 7-5: desviación covarianza inicial ventana Caso CNP100 FB	46
Tabla 7-6: Desviación covarianza inicial ventana Caso DEN67 FB	46
Tabla 7-7: Desviación covarianza caso CNP100 BI	47
Tabla 7-8: Desviación covarianza inicial ventana Caso ICA50 BI.....	47
Tabla 7-9: Anchos y traslapes de ventana casos base fija.....	48
Tabla 7-10: Anchos y traslapes casos base aislada.....	48
Tabla 7-11: Frecuencias identificada DSI pequeñas ventanas casos base fija.....	59
Tabla 7-12: Frecuencias identificadas casos base aislada.....	59
Tabla 9-1: Tabla resultados finales frecuencias y amortiguamiento base fija.....	89
Tabla 11-1: Desviación covarianza caso ICA50 FB	99
Tabla 11-2: Desviación covarianza caso ICA100 FB.....	100
Tabla 11-3: Desviación covarianza caso DEN100 FB	100
Tabla 11-4: Desviación covarianza caso ICA50.....	100
Tabla 11-5: Desviación covarianza caso ICA100.....	100
Tabla 11-6: Desviación covarianza caso ICA100.....	101
Tabla 11-7: Desviación covarianza caso ICA140.....	101

Índice de figuras

Figura 2-1: Ejemplo espectro densidad de potencia	6
Figura 2-2: Ecuaciones DSI (Astroza et al., 2015)	9
Figura 2-3: Esquema Filtro Kalman, Predicción-corrección (Astroza, Gutiérrez, Repenning, & Hernández, 2018).....	12
Figura 2-4: esquema general UKF con modelo de elementos finitos. (Astroza et al., 2015).....	13
Figura 3-1: interpolación entre ventanas (Hernández et al., 2008)	17
Figura 3-2: Esquema optimización Filtro de Kalman	18
Figura 4-1: Esquema optimización Newton-Raphson.....	21
Figura 5-1: Registro CNP100.....	22
Figura 5-2: Respuesta con parámetros totalmente invariantes en el tiempo.	23
Figura 5-3: Frecuencias variantes en el tiempo caso teórico.....	24
Figura 5-4: Respuesta modelo teórico con frecuencia variable en el primer modo, registro CNP100.....	25
Figura 5-5: PSD mediciones modelo teórico, registro CNP100.....	26
Figura 5-6: Espectrograma modelo teórico con frecuencia variable en el primer modo, registro CNP100.....	28
Figura 5-7: Frecuencia en el tiempo e IA (CNP100 FB)	29
Figura 5-8: Variación amortiguamiento en el tiempo modelo teórico (CNP100 FB). 30	
Figura 5-9: Variación MAC canal modelo teórico (CNP100 FB)	31
Figura 5-10: Respuesta cada canal modelo teórico (CNP100)	32
Figura 6-1: Edificio BNCS (a) estructura con recubrimiento (b) estructura sin recubrimiento	33
Figura 6-2: Edificio BNCS, vista en elevación	34
Figura 6-3: Edificio BNCS (a) estructura con recubrimiento (b) estructura sin recubrimiento	34
Figura 6-4: Dimensiones Aislador sísmico Edificio BNCS.....	35
Figura 6-5: Imagen Aislador sísmico	35
Figura 6-6: Disposición sensores (1-72)	36
Figura 7-1: Registro aceleraciones cada canal (CNP100 FB)	39
Figura 7-2: Registro aceleraciones cada canal (DEN67 FB)	40
Figura 7-3: Registro aceleraciones cada canal (CNP100 BI).....	41
Figura 7-4: Registro aceleraciones cada canal (ICA50).....	42
Figura 7-5: Formas modales CNP100 FB	44

Figura 7-6: Formas modales CNP100 BI	45
Figura 7-7: PSD caso CNP100 FB.....	49
Figura 7-8: PSD caso CNP100.....	50
Figura 7-9: Ajuste respuesta canal superior Caso CNP100 FB	51
Figura 7-10: Respuesta Calcula UKF CNP100 FB.....	52
Figura 7-11: Respuesta Calcula UKF DEN67 FB.....	53
Figura 7-12: Respuesta Calcula UKF CNP100 BI.....	54
Figura 7-13: Variación parámetros normalizados UKF (CNP100 FB).....	55
Figura 7-14: Desviación estándar parámetros normalizados UKF (CNP100 FB, modo 1)	56
Figura 7-15: Variación parámetros normalizados UKF (CNP100 BI, modo 1)	57
Figura 7-16: Desviación estándar parámetros normalizados UKF (CNP100 BI, modo 1)	58
Figura 7-17: Frecuencias en el tiempo UKF (CNP100 FB).....	60
Figura 7-18: Frecuencias en el tiempo UKF (DEN67 FB).....	61
Figura 7-19: Frecuencias en el tiempo UKF (CNP100 BI)	62
Figura 7-20: Frecuencias en el tiempo UKF (ICA50 BI)	63
Figura 7-21: Transferectograma por pequeñas ventanas (CNP100 FB)	64
Figura 7-22: Transferectograma por pequeñas ventanas (DEN67 FB).....	65
Figura 7-23: Transferectograma por pequeñas ventanas (ICA50 BI)	66
Figura 7-24: Aceleración cada modo (CNP100 FB).....	67
Figura 7-25: Aceleración cada modo (CNP100 BI).....	68
Figura 7-26: Amortiguamiento en el tiempo (CNP100 FB).....	69
Figura 7-27: Amortiguamiento en el tiempo (DEN67 FB)	70
Figura 7-28: Amortiguamiento en el tiempo (CNP100 BI).....	71
Figura 7-29: Amortiguamiento en el tiempo (ICA50 BI).....	72
Figura 7-30: Formas modales CNP100 FB	73
Figura 7-31: Formas modales CNP100 BI t=15 seg	74
Figura 7-32: MAC en el tiempo CNP100 FB.....	75
Figura 7-33: MAC en el tiempo DEN67 FB	76
Figura 7-34: MAC en el tiempo CNP100 BI.....	77
Figura 8-1: Frecuencia en el tiempo construida con peak picking para optimización N-R (CNP100 FB)	79
Figura 8-2: Respuesta calculada con N-R y método peak picking(CNP100 FB).....	80
Figura 8-3: Amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R y método peak-picking (CNP100 FB)	81
Figura 8-4: Respuesta frecuencia y amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (CNP100 FB)	82

Figura 8-5: Transferectograma y frecuencias ajustadas en el tiempo (CNP100 FB).	83
Figura 8-6: Ajuste tasas de amortiguamiento en el tiempo (CNP100 FB).....	84
Figura 8-7: Respuesta frecuencia y amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (ICA100)	84
Figura 8-8: Ajuste tasas de amortiguamiento en el tiempo (ICA100)	85
Figura 8-9: Transferectograma y frecuencias ajustadas en el tiempo (ICA100 BI) ...	85
Figura 9-1: Espectro de aceleración casos base Fija.....	88
Figura 9-2: Frecuencia en el tiempo todos los registros FB.....	90
Figura 9-3: Amortiguamiento en el tiempo todos los registros FB.....	91
Figura 9-4: Frecuencia en el tiempo todos los registros BI.....	91
Figura 9-5: Amortiguamiento en el tiempo todos los registros BI.....	92
Figura 11-1: Registro aceleraciones cada canal (ICA50 FB).....	94
Figura 11-2: Registro aceleraciones cada canal (ICA100 FB).....	95
Figura 11-3: Registro aceleraciones cada canal (DEN100 FB)	96
Figura 11-4: Registro aceleraciones cada canal (ICA100)	97
Figura 11-5: Registro aceleraciones cada canal (ICA140)	98
Figura 11-6: Registro aceleraciones cada canal (LAC100)	99
Figura 11-7: Respuesta calculada caso ICA50 FB	101
Figura 11-8: Respuesta calculada caso ICA100 FB.....	102
Figura 11-9: Respuesta calculada caso DEN100 FB	103
Figura 11-10: Respuesta calculada caso ICA100.....	104
Figura 11-11: Respuesta calculada caso ICA140.....	105
Figura 11-12: Respuesta calculada caso LAC100.....	106
Figura 11-13: PSD (ICA50 FB)	107
Figura 11-14: PSD (ICA100 FB)	108
Figura 11-15: PSD (DEN67 FB).....	109
Figura 11-16: PSD (ICA100).....	110
Figura 11-17: PSD (LAC100).....	111
Figura 11-18: Transferectogramas y frecuencias calculadas (ICA50 FB)	112
Figura 11-19: Transferectogramas y frecuencias calculadas (ICA100 FB).....	113
Figura 11-20: Transferectogramas y frecuencias calculadas (DEN100 FB)	114
Figura 11-21: Transferectogramas y frecuencias calculadas (ICA100).....	115
Figura 11-22: Transferectogramas y frecuencias calculadas (ICA140).....	116
Figura 11-23: Transferectogramas y frecuencias calculadas (LAC100).....	117
Figura 11-24: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 FB, modo 1)	118
Figura 11-25: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 FB, modo 2)	119

Figura 11-26: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 FB, modo 3)	120
Figura 11-27: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 FB, modo 1)	121
Figura 11-28: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 FB, modo 2)	122
Figura 11-29: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 FB, modo 3)	123
Figura 11-30: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (DEN100 FB, modo 1)	124
Figura 11-31: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (DEN100 FB, modo 2)	125
Figura 11-32: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (DEN100 FB, modo 3)	126
Figura 11-33: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 BI, modo 1)	127
Figura 11-34: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 BI, modo 2)	128
Figura 11-35: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 BI, modo 1)	129
Figura 11-36: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 BI, modo 2)	130
Figura 11-37: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA140 BI, modo 1)	131
Figura 11-38: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA140 BI, modo 2)	132
Figura 11-39: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (LAC100 BI, modo 1)	133
Figura 11-40: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (LAC100 BI, modo 2)	134
Figura 11-41: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (ICA50 FB)	135
Figura 11-42: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (ICA100 FB)	136
Figura 11-43: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (DEN100 FB)	137
Figura 11-44: Amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (ICA50 FB)	137
Figura 11-45: Amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (ICA100 FB)	138
Figura 11-46: Amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (DEN100 FB)	138
Figura 11-47: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (ICA100 BI)	139
Figura 11-48: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (ICA140 BI)	140

Figura 11-49: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (LAC100 BI)	141
Figura 11-50: MAC en el tiempo ICA50 FB	142
Figura 11-51: MAC en el tiempo ICA100 FB	143
Figura 11-52: MAC en el tiempo DEN100 FB	144
Figura 11-53: MAC en el tiempo ICA50 BI	145
Figura 11-54: MAC en el tiempo ICA100 BI	146
Figura 11-55: MAC en el tiempo ICA140 BI	147
Figura 11-56: MAC en el tiempo LAC100 BI	148
Figura 11-57: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (ICA50 FB)	149
Figura 11-58: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (ICA100 FB)	150
Figura 11-59: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (DEN67 FB)	151
Figura 11-60: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (DEN100 FB)	152
Figura 11-61: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (ICA50 BI)	153
Figura 11-62: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (CNP100 BI)	154
Figura 11-63: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (ICA100 BI)	155
Figura 11-64: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (LAC100 BI)	156
Figura 11-65: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (ICA50 FB)	157
Figura 11-66: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (ICA100 FB)	157
Figura 11-67: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (DEN67 FB)	158
Figura 11-68: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (DEN100 FB)	158
Figura 11-69: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (ICA100 BI)	159
Figura 11-70: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (LAC100 BI)	159

1 Introducción

1.1 Introducción general

La estimación de los parámetros dinámicos de un edificio ha sido estudiada por diversos autores, en los que se opta por diferentes metodologías para identificarlos. En términos generales es reconocido que las propiedades dinámicas de las estructuras pueden variar por efectos ambientales, es así como (Boroschek & Lazcano, 2008) estudiaron la variación de los parámetros modales del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción, instrumentado por RENADIC, debido a efectos ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, la presión atmosférica, precipitación y viento, utilizando registros de micro vibración y técnicas de identificación lineal-elástica del tipo espacio-estado (SSI). Por otra parte, las propiedades dinámicas de las estructuras pueden ser altamente variables durante eventos sísmicos, por ejemplo, (Belmar Vásquez, 2019) aplicó una estimación de la variación de las propiedades dinámicas de una estructura a escala de cinco niveles con comportamiento altamente no lineal ensayada en la mesa vibradora del LEE (Universidad de Chile). Para ello, Belmar empleó la función de transferencia por pequeñas ventanas para estimar como las frecuencias naturales de la estructura variaban en el tiempo; luego se utilizó el ajuste de la respuesta dinámica de la estructura (usando teoría modal) con los datos experimentales usando algoritmos de optimización del tipo Newton-Raphson de manera de estimar como las tasas de amortiguamiento y formas modales cambian durante el sismo.

En este sentido las diferencias que puede traer el uso de pequeñas, moderadas o grandes vibraciones ha sido estudiada por diversos autores, entre los cuales se puede mencionar a (Dunand, Gueguen, Bard, Rodgers, & Celebi, 2006), para registros de baja intensidad, se utiliza un análisis tipo Randomdec para obtener frecuencias y amortiguamientos aproximados. Este análisis está basado en la extracción de la respuesta característica de un oscilador de un grado de libertad sometido a vibración aleatoria, el cual, al ser superpuesto en un gran número de ventanas con las mismas condiciones iniciales hace posible la determinación de las características dinámicas del sistema. Por otro lado, para registros de mediana intensidad se utiliza técnicas relacionadas a funciones de transferencia con la forma de modelos ARMA (Modelo auto regresivo de media móvil) de manera de comparar la transformada teórica del impulso con las características de un modelo ARMA. Ambos análisis fueron utilizados para registros en un mismo edificio donde se concluyó que las frecuencias modales decrecen para mayores intensidades, siendo estas también extrapolables desde los registros de vibración ambiental. No así resultó con el amortiguamiento, el cual

presentó un mayor grado de incertidumbre y no pudo correlacionarse entre los registros de baja y mediana intensidad.

Otros autores como (Kitada, 1998) buscaron identificar los parámetros del sistema dinámico utilizando el análisis Wavelet (un tipo de análisis armónico ampliamente utilizado en el campo del análisis de señales). Este caso en particular se estudió con un modelo físico a escala, tipo edificio de corte, de 5 pisos fabricado en acero donde la masa de cada piso es conocida. Fue diseñado de tal manera que se forzaría la entrada en fluencia para las excitaciones mayores (1.5 m/s^2). Los resultados de estos autores permitieron representar el comportamiento histerético del sistema dinámico el cual representó los parámetros de rigidez y amortiguamiento de manera muy precisa para sus casos lineales y altamente no lineales donde estos parámetros eran altamente variables en el tiempo.

En el contexto del análisis de sismos moderados, el trabajo de (Carreño & Boroschek, 2002) y (Carreño Vallejos, 2009) se desarrolló un modelo MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) donde se estimaron las propiedades dinámicas (invariantes o variable en el tiempo por pequeñas ventanas) del edificio de la cámara chilena de la construcción durante sismos registrados, minimizando una función de error cuadrático (usando algoritmos de Newton-Raphson) entre los registros medidos y la respuesta dinámica del edificio que fue modelada en forma simplificada a partir de una respuesta descrita exclusivamente a partir de sus parámetros modales (variables o invariables en el tiempo).

En forma similar al método MIMO empleado por Carreño se propone en esta memoria identificar las propiedades dinámicas (variables o invariables en el tiempo) del edificio BNCS de la mesa vibratoria de San Diego y se realizará una calibración de la respuesta modal en función de parámetros modales usando métodos de calibración Bayesiana del tipo filtro de Kalman (UKF) (en vez de algoritmos Newton-Raphson). En estricto rigor, los filtros de Kalman son un tipo particular de algoritmo Bayesiano y/o filtro de partículas. Los filtros de Kalman son una herramienta ampliamente utilizada en el campo de la tecnología y posee 2 variantes que son aplicables en modelos no lineales (EKF y UKF) con distribución Gaussiana de sus parámetros. Diversos autores han estudiado estos algoritmos con el fin de la obtención de parámetros en modelos altamente no lineales. Un primer ejemplo es (Ching, Beck, Porter, & Shaikhutdinov, 2015) donde se utiliza un filtro de partículas que, a diferencia del UKF o EKF, permite una distribución no gaussiana de los sigma points. El filtro logra estimar correctamente los parámetros de un sistema dinámico altamente no lineal, sin embargo, requiere un esfuerzo computacional mucho mayor, el cual en ciertos contextos resulta prohibitivo.

En este contexto, al igual que el trabajo de Carreño se realizarán ajustes del registro completo y por pequeñas ventanas con el fin de estimar como varían las propiedades dinámicas de la estructura.

Calibraciones de modelos de elementos finitos lineales y/o no-lineales por medio de métodos Bayesianos han sido presentadas ampliamente en la literatura. Por ejemplo, (Astroza, Ebrahimian, & Conte, 2015) emplearon métodos Bayesianos UKF para calibrar parámetros de modelos de elementos finitos (FE) de una estructura tipo marco de manera que la respuesta modelada se ajustase a la experimental. A diferencia de la calibración de parámetros de elementos finitos, se propone que la calibración de parámetros modales utilizando métodos Bayesianos podría ser más fidedigna (y simple) dado que el modelo de elementos finitos inicial no sólo posee incertidumbres asociada a los parámetros calibrados, sino que también podría contener información sesgada debido a una incorrecta modelación de la estructura o debido a que otros parámetros de la modelación no han sido considerados en la calibración.

De la misma manera (Katafygiotis & Beck, 1998) utiliza un algoritmo bayesiano estadístico para obtener los parámetros dinámicos de un sistema no lineal, donde el propósito no es únicamente obtener los parámetros, sino además cuantificar la precisión de dichas estimaciones. Es necesario para esto tener las funciones de densidad de probabilidad de cada parámetro en cada una de las iteraciones, sin embargo, dichos autores propusieron reemplazarla por una sumaalzada de las funciones de probabilidad de manera de reducir el esfuerzo computacional que usualmente requieren los filtros de partículas.

En este sentido se puede recalcar que los algoritmos Bayesianos han sido ampliamente utilizados en el campo del análisis de señales de sistemas dinámicos, donde los parámetros son variables en el tiempo. Al acotar ciertas características del algoritmo, como el tipo de distribución de los sigma points en el caso de UKF (distribución Gaussiana) , o bien, tratar de diferente manera esta distribución de puntos como se hace en (Katafygiotis & Beck, 1998) se permite reducir el esfuerzo computacional el cual puede llegar a ser muy exigente en los casos donde se requiere la optimización de un gran número de parámetros como; por ejemplo: una estructura en elementos finitos (Astroza et al., 2015). Al mismo tiempo, el hecho que los registros de aceleración sean muy extensos hace imperativo el uso de ventanas como propusieron los autores citados anteriormente.

1.2 Motivación

Las motivaciones que llevan a realizar este trabajo de título son el comprender como los daños afectan los parámetros dinámicos, o bien, comprender como y en qué medida

responde un edificio frente a una demanda sísmica que le pueda generar daño y/o cambios durante el sismo.

El caso del edificio BNCS de la mesa vibratoria de San Diego es un excelente caso para ser estudiado con algoritmos de optimización dado su densa instrumentación. Además, fue ensayado con diversos tipos de sismos, de diferentes intensidades. También fue sometido a vibraciones ambientales.

El analizar cómo cambia el comportamiento dinámico frente al daño y/o la demanda sísmica permitiría predecir de mejor manera como se comportaría el edificio en el futuro, además de correlacionar los daños observados con la modificación de los parámetros modales. Las rutinas implementadas serán incluidas en futuro a los informes automatizados que genera RENADIC de manera que estos resultados sean rápidamente procesados luego de acontecido un sismo, permitiendo obtener una información más completa de la respuesta sísmica de estructuras instrumentadas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Generales

Desarrollar una rutina que permita ajustar la respuesta de un modelo matemático a los valores reales medidos del edificio BNCS de San Diego. Esto aplicando una optimización Bayesiana de los parámetros modales dinámicos complementada con un método de optimización con Newton-Raphson con mínimos cuadrados.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos son primordialmente generar una rutina que pueda ser utilizada por RENADIC para la generación de informes automáticos de los registros de aceleración del edificio BNCS. Además, debe ser idealmente adaptable para poder optimizar parámetros, variables en el tiempo, de otras estructuras monitoreadas por RENADIC.

1.4 Resultados esperados

Se espera observar la evolución temporal de los parámetros modales del edificio BCNS a través del tiempo mientras ocurren eventos sísmicos. Además, se espera que el método de calibración tenga una convergencia clara en estos parámetros y permita determinar sus incertidumbres en términos cuantitativos.

Se espera que con el análisis de resultados se tengan los parámetros modales fundamentales del edificio tales como las formas modales, tasas de amortiguamiento, factores de participación modal y frecuencias naturales que dominan la respuesta sísmica.

2 Marco Teórico

Como bien fue propuesto por (Carreño Vallejos, 2009), es posible modelar el comportamiento de una estructura a través de un modelo modal dinámico. La técnica utilizada en ese caso implicaba la minimización de una función de error entre la respuesta generada por este modelo y las mediciones reales, buscando una optimización de los parámetros invariantes en el tiempo.

El modelo que genera la respuesta según los parámetros en el tiempo es un modelo modal dinámico basado en las ecuaciones modales fundamentales:

$$\ddot{y}_j(t) + 2\omega_j\xi_j\dot{y}_j(t) + \omega_j^2 y_j(t) = \sum_{g=1}^k (L_{j,i} u_{g_i}(t)) \quad (2.1)$$

$$a_p(t) = \sum_{j=1}^n \phi_{j,p} \ddot{y}_j(t) \quad (2.2)$$

a_p : aceleración cada gdl

$\phi_{j,p}$: forma modal con grado de participación, modo j , gdl p

w_j : frecuencia modo j

u_g : aceleración de entrada

$L_{j,i}$: factor de participación modal

Las entradas del modelo modal serían, por ende, la aceleración de entrada, además de la frecuencia, tasa de amortiguamiento y formas modales sin normalizar. En todos los casos con sus valores calculados en el tiempo.

Para el estudio de las variaciones modales de la estructura se pueden implementar diferentes técnicas para la identificación de parámetros modales. Al menos como manera de obtener parámetros iniciales de entrada para el algoritmo o bien como manera de comparar resultados con los generados por el filtro de Kalman.

Un primer análisis en el contexto de la identificación de frecuencia es el espectro de densidad de potencia (PSD). El cual permite tener el dominio de frecuencias de una señal dada. Representa primordialmente la cantidad de energía para cada frecuencia para un rango específico. En este contexto será principalmente usado para obtener las frecuencias fundamentales. Ahora bien, si otros métodos son capaces de entregar más información, el PSD se presenta como el más simple para la obtención de las frecuencias fundamentales.

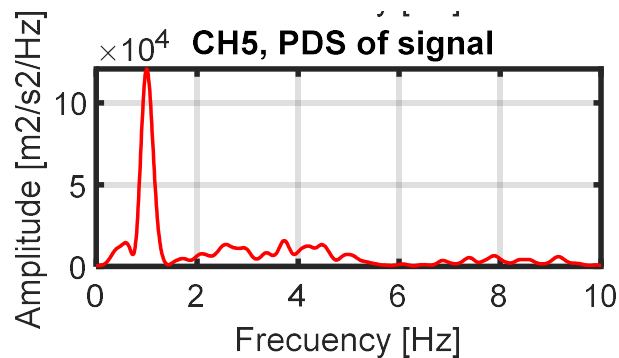


Figura 2-1: Ejemplo espectro densidad de potencia

En la **Figura 2-1** se puede observar cómo se distribuye la energía en cada rango de frecuencias para una determinada señal. Dicho procedimiento es análogo para el procesamiento de las señales de los acelerómetros, donde se espera observar un dominio de las frecuencias de los primeros modos de la estructura. Este primer análisis nos permitiría obtener las frecuencias a priori del edificio en los registros antes de realizar las optimizaciones de los parámetros, ya sea con filtros de Kalman u optimización de mínimos cuadrados con Newton-Raphson. Sin embargo, la respuesta de una estructura se relaciona al input sísmico, por tanto, el PSD como tal puede estar altamente influenciado por el input sísmico y en tal caso una función de transferencia es una medida más fidedigna para obtener las frecuencias fundamentales de estructuras.

Por lo tanto, resulta más completo el uso de transferectograma por pequeñas ventanas, el cual se analizará en detalle tanto para la utilización de optimización con algoritmos Newton-Raphson (N-R) como también para filtros de Kalman (comparación de la frecuencia calculada en el tiempo). El transferectograma por pequeñas ventanas es semejante al espectrograma con la excepción de lograr representar las frecuencias del modelo dinámico independiente de la potencia de la aceleración de entrada.

Previo al análisis de las señales se requiere filtrar las señales. Las señales de entrada a algoritmo deben ser filtradas en un rango de frecuencias determinados, esto significa remover ciertas frecuencias que no son relevantes o bien que comprenden un rango de frecuencias no asociado a la medición (ruido ambiental). Para efecto de las mediciones de esta memoria se utiliza un filtro Butterworth orden 10 y frecuencia de corte de 30 veces la frecuencia de muestreo (F_s). En estos casos la frecuencia de muestreo es de 200 Hz.

La explicación anterior engloba principalmente el trabajo que se tiene que dar con las frecuencias de las mediciones, por un lado, el PSD ayuda a identificarlas y bajo el mismo contexto también se requiere filtrar las señales de entrada de forma de eliminar

los rangos de frecuencias que se sabe de antemano que corresponden a ruidos ambientales.

Sin embargo, este análisis no entrega todos los parámetros necesarios para establecer un punto de partida a la optimización. Dado que se está utilizando un modelo modal para representar la respuesta del sistema dinámico, son necesarios las tasas de amortiguamiento iniciales por modo, sus frecuencias y las formas modales multiplicadas por su factor de participación modal.

Cabe recalcar que las formas modales en el código en MATLAB incluyen siempre su factor de participación. Esto es necesario dado que no se conoce la matriz de masa, o bien se pretende que el algoritmo funcione sin ella. Dado factor de participación no se conoce a priori, es posible estimarlo según la distribución de masas en cada piso.

$$\begin{aligned}
 M = & \begin{matrix} M_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_1 \end{matrix} \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

Donde los factores de participación modal se definen como:

$$\begin{aligned}
 L_{m_i} &= \{\phi_i\} \cdot [M] \cdot \{r\} \\
 \Rightarrow \phi &= \phi_i \cdot L_{m_i} \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

Esto implica que el factor de participación modal depende de la distribución de masa en casa piso y de la forma modal en sí. En ciertos casos se podría proponer una masa idéntica en cada piso si es que no se conoce la matriz de masa de la estructura (lo que usualmente es así). En las configuraciones estudiadas en este trabajo de título. Es posible distinguir dos matrices de masa distintas, una para el caso de base fija y otra para el caso de base aislada.

Ahora bien, lo importante del factor de participación es como la masa total del edificio se distribuye en cada piso, lo que permite construir una matriz de masa sin conocer las masas en sí, si no únicamente determinar una distribución de estas sobre la diagonal de la matriz. De esta forma una matriz de identidad representaría que en cada piso tiene la misma masa, independiente la masa del edificio.

Ahora bien, si las frecuencias son relativamente sencillas de obtener con PSD, resulta necesario utilizar un método más completo y avanzado para obtener formas modales con su tasa de participación y las tasas de amortiguamiento para cada modo. El método

propuesto en esta memoria, como forma de calcular parámetros iniciales de entrada, es el DSI por pequeñas ventanas, el cual se describirá a continuación.

2.1 DSI por pequeñas ventanas

DSI (Deterministic Stochastic Subspace Identification) es un método espacio estado de tiempo discreto. Fue Desarrollado por Van Overschee & De Moor (1996) y fue estudiado en detalle por (Díaz, 2018) para un enfoque similar al de esta memoria. El método DSI puede determinar propiedades dinámicas (frecuencia, amortiguamiento, formas modales) a partir de datos de entrada y salida. Eso sí, considera para el cálculo propiedades invariantes en el tiempo. Razón por la cual se utiliza en pequeñas ventanas de tiempo.

El método DSI se utiliza previo al algoritmo para obtener los parámetros iniciales del algoritmo. Si bien se puede obtener un diagrama de estabilidad para la totalidad del registro, para efectos de esta memoria interesa mayormente obtener las frecuencias fundamentales y formas modales iniciales de manera que el filtro de Kalman comience en los valores más cercanos posibles a la realidad, luego la matriz de covarianza define un grado de desviación inicial en cada ventana lo que determinaría de cierta manera la convergencia del resultado y el rango en que la optimización comienza a trabajar.

Un análisis en detalle con este procedimiento fue realizado por (Díaz, 2018) donde se obtuvieron resultados alentadores, también analizando el edificio BNCS por método de subestructuración, también estudiado en detalle en (Congdon, Skurdal, Hahn, & Sturdy, 2017).

En la **Figura 2-2** se puede observar las ecuaciones utilizadas para el cálculo de DSI para parámetros invariantes en el tiempo.

<p>1. Definir Matrices de Hankel del Sistema:</p> $\mathbf{U}_{0(2i-1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{0(i-1)} \\ \mathbf{U}_{i(2i-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{U}_f \end{pmatrix} \quad ; \quad \mathbf{Y}_{0(2i-1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{0(i-1)} \\ \mathbf{Y}_{i(2i-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_p \\ \mathbf{Y}_f \end{pmatrix}$
<p>2. Calcular las proyecciones:</p> $\mathbf{O}_i = \mathbf{Y}_f /_{\mathbf{U}_f} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{Y}_p \end{pmatrix} \quad ; \quad \mathbf{O}_{i+1} = \mathbf{Y}_f^* /_{\mathbf{U}_f^*} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_p^* \\ \mathbf{Y}_p^* \end{pmatrix}$
<p>3. Calcular el orden del sistema mediante la descomposición de valores singulares:</p> $\mathbf{W}_1 \mathbf{O}_i \mathbf{W}_2 = (\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2) \begin{pmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{pmatrix} = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T$ <p>$\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$: Matrices de peso</p>
<p>4. Calcular las matrices de observabilidad extendida Γ_i y Γ_{i+1}:</p> $\Gamma_i = \mathbf{W}_1^{-1} \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{-1/2}$ <p>Γ_{i+1} es definido por Γ_i sin las últimas l filas</p>
<p>5. Determinar los valores de $\tilde{\mathbf{X}}_i$ y $\tilde{\mathbf{X}}_{i+1}$:</p> $\tilde{\mathbf{X}}_i = \Gamma_i^T \mathbf{O}_i \quad ; \quad \tilde{\mathbf{X}}_{i+1} = \Gamma_{i+1}^T \mathbf{O}_{i+1}$
<p>6. Resolver el sistema de ecuaciones lineales para $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{C}_d$ and \mathbf{D}_d:</p> $\begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{i(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{C}_d & \mathbf{D}_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_i \\ \mathbf{U}_{i(i)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{p}_v \\ \mathbf{p}_r \end{pmatrix}$
<p>7. Calcular los valores propios μ y vectores propios (Ψ) de la matriz \mathbf{A}_d.</p>
<p>8. Determinar las propiedades dinámicas:</p> $f_r = \frac{\sqrt{\lambda_r \lambda_r^*}}{2\pi}$ $\xi_r = \frac{-\text{Re}(\lambda_r)}{ \lambda_r }$ $\Phi = \mathbf{C}_d \Psi$ <p>Con</p> $\lambda_r = \frac{\ln(\mu_r)}{\Delta t}$

Figura 2-2: Ecuaciones DSI (Astroza et al., 2015)

Además de encontrar los parámetros para iniciar el algoritmo se deben tener en cuenta otros conceptos para interpretar el cálculo de las propiedades estructurales.

Uno de ellos es la intensidad de Arias (IA), la cual recibe el nombre en honor a su creador, el profesor Arturo Arias de la Universidad de Chile. La IA reconoce el patrón de atenuación y amplificación de las ondas sísmicas. En la práctica y para efectos de esta memoria interesa estudiarla como la integral de la aceleración al cuadrado, en particular delimitar la zona de 5% y 95% de la intensidad de Arias, que es comúnmente considerado como la parte del registro asociada al movimiento fuerte

$$IA = \int_{t_i}^{t_f} u_g^2(t) \quad (2.5)$$

Este rango nos indica donde se encuentra la mayor parte de la energía del registro, lo que delimita el rango donde interesa la operación del algoritmo estudiado en esta memoria. Fuera de este rango es posible que el algoritmo intente optimizar el ruido ambiental lo que puede generar determinaciones erróneas de los parámetros.

Por otro lado, se debe tener también una manera de interpretar la variación en las formas modales del sistema dinámico. Esto da una idea si la optimización tiende a modificar la forma de los modos que se dieron como entrada inicial. Aunque también podría mostrar si hay variación de las formas modales durante el movimiento sísmico. Sin embargo, en el estado del arte, donde se ha estudiado el comportamiento sísmico de edificios, todo parece indicar que las formas modales permanecen prácticamente invariantes en el tiempo.

En ese sentido, se utilizará el MAC (Modal Assurance Criterion). El MAC permite cuantificar la variación de las formas modales en el tiempo. Para el caso de esta memoria interesa particularmente en el cambio de las formas modales en el tiempo respecto al valor inicial. Por una parte, esto confirma si la forma modal identificada para iniciar el algoritmo se mantiene relativamente constante o bien cambia en el tiempo perdiendo correlación con la forma modal inicial.

$$MAC_{acumulado}(\{\phi_1\}, \{\phi_p\}) = \frac{|\{\phi_1\}^H \cdot \{\phi_p\}|^2}{(\{\phi_1\}^H \cdot \{\phi_1\}) \cdot (\{\phi_p\}^H \cdot \{\phi_p\})} \quad (2.6)$$

Se define p como el timestep del cálculo del MAC, es decir, cada cuanto paso se tiempo se calcula el MAC.

Todos estos conceptos son de suma importancia para los alcances que tiene este trabajo de título, aun sin entrar a explicar el algoritmo utilizado, el cual funciona mediante filtros de Kalman.

Si bien se utiliza optimización Bayesiana como método principal, se comparará las propiedades dinámicas identificadas con la respuesta del modelo y las mediciones utilizando un método de optimización de mínimos cuadrados como lo es el algoritmo de Newton-Raphson. En síntesis, se optimizarían los parámetros por pequeñas ventanas, buscando el valor óptimo que minimice una función de error. El hecho de trabajar con este tipo de algoritmo trae consigo un mayor control sobre el cálculo.

Delimitar máximos o mínimos, en particular en la tasa de amortiguamiento logra evitar divergencias en el calculo que se podrían producir con UKF operando con altas covarianzas.

El análisis con N-R que tiene un enfoque diferente con los filtros de Kalman busca poder comparar ambos procesos de optimización y comprender cual podría resultar más robusto.

El principal método utilizado en este trabajo de título es un tipo de optimización Bayesiana, la cuales comprenden una amplia gama de algoritmos de optimización, estos tienen en común el hecho de ser una inferencia estadística en la cual se emplea de fondo el teorema de Bayes.

El razonamiento lógico de este tipo de optimización consiste en darle un estimador numérico al grado de creencia de una hipótesis de ser verdadera. Esto antes de observar las mediciones y luego calculando un estimador después de observar las mediciones. De esta manera ver el grado de exactitud que tuvo la predicción previa.

2.2 Filtro de Kalman (UKF)

El filtro de Kalman es utilizado ampliamente en computación y procesamiento de señales, comprende un tipo específico de optimización Bayesiana. Su proceso consiste, a grandes rasgos, predecir y corregir en cada estado de tiempo las variables que definen la respuesta dinámica del sistema (en este caso parámetros modales).

Dentro de los filtros de existen dos variantes que son aplicables en modelos no lineales (EKF y UKF). Ambas con distribución gaussiana de sus sigma points (SP).

En primer lugar, el filtro de Kalman debe crear un set de parámetros con una distribución gaussiana los cuales se presentan como los “sigma points” (SP), los cuales son básicamente los parámetros dispersos considerando una distribución del tipo gaussiana, con lo cual se tiene un set de SP que corresponden a un conjunto de set de combinaciones de parámetros que se determinan de los valores medios y varianza considerada para cada parámetro a optimizar. Dicha distribución para los sigma points está condicionada por una matriz de covarianza fija la cual actualiza estos SP tiempo por tiempo (Matriz de ruido de proceso, Q). Al evaluar estos sigma points (SP) en la función no lineal y compararlos con los datos medidos se modifica la media y matriz de covarianza para realizar la predicción en el paso de tiempo siguiente (Update State estimate). De esta manera el proceso de predicción de actualiza y corrige en cada paso de tiempo.

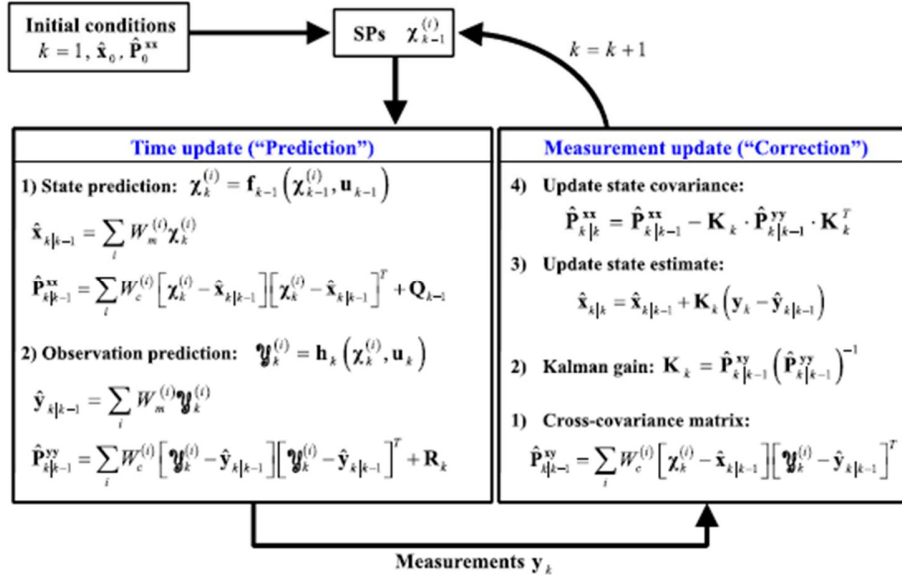


Figura 2-3: Esquema Filtro Kalman, Predicción-corrección (Astroza, Gutiérrez, Repenning, & Hernández, 2018)

En el estado del arte se ha aplicado para diferentes tipos de optimizaciones. En el Marco del análisis estructura (Astroza, Gutiérrez, Repenning, & Hernández, 2018) utilizaron filtros de Kalman para ajustar los parámetros de un modelo de elementos finitos, donde el modelo en el cual se analizan los SP es un modelo computacional en OpenSees. Mientras tanto los parámetros son las propiedades de los elementos finitos en sí, ya sea rigidez, módulo de elasticidad, etc.

En la siguiente figura se puede apreciar el esquema utilizado por (Astroza et al., 2015), para la optimización con un modelo de elementos finitos.

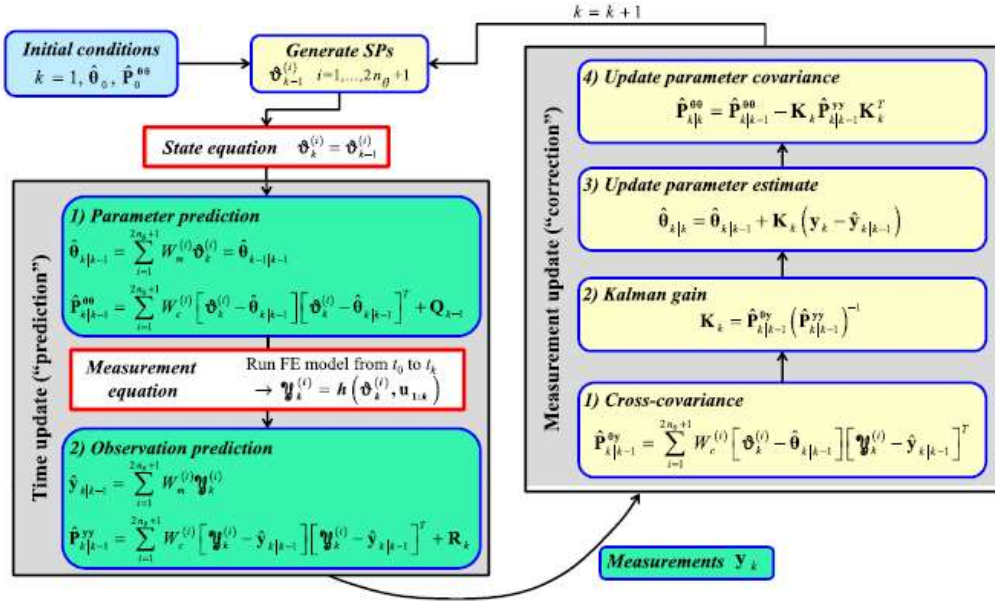


Figura 2-4: esquema general UKF con modelo de elementos finitos. (Astroza et al., 2015)

3 Algoritmo de optimización de parámetros dinámicos utilizando filtro de Kalman (UKF)

El algoritmo utilizado en esta memoria de título comprende, además de los temas anteriores del marco teórico, otros métodos que buscan analizar la variación de los parámetros en el tiempo los cuales se espera que tengan un comportamiento histórico no lineal durante un sismo de mediana o alta intensidad. Dicha propiedad requiere un análisis por ventanas de los registros, de manera de obtener una optimización de los parámetros en diferentes tiempos y de esta manera comparar el resultado ventana a ventana.

En primer lugar, el set de parámetros a optimizar es siempre para cada uno de los modos; la forma modal, el amortiguamiento y la frecuencia. El largo de este vector dependerá de los grados de libertad de la estructura y de la cantidad de modos que se quieran analizar.

$$\hat{x} = \left\{ \begin{array}{c} f_1 \\ \beta_1 \\ \phi_{1,1} \\ \vdots \\ \phi_{1,n} \\ f_2 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \phi_{n,n} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Ya definidos los parámetros a optimizar, es necesario normalizarlos respecto a algún vector, usualmente se utiliza el vector inicial de parámetros. Es importante recalcar que al estar normalizados los valores los cambios que se observan en los gráficos pueden representar ordenes muy diferentes de magnitud. Esto también tiene especial importancia con la matriz de covarianza, dado que el grado de desviación opera respecto a los valores normalizados.

La matriz de covarianza da una desviación inicial en cada ventana, esto define en gran medida la convergencia de los resultados. La desviación necesaria para operar depende de las características de la estructura y los comportamientos altamente no lineales implican variaciones rápidas de los parámetros, lo que hace difícil estimar la cantidad de desviación necesaria para cada ventana sin tener a priori una idea misma del comportamiento.

Se define entonces un grado de desviación para cada uno de los parámetros que se está optimizando y este se eleva al cuadrado, con estos valores se construye la diagonal de la matriz de covarianza.

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_{f_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\phi_{1,1}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_{1,n}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_{n,n}}^2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La matriz de covarianza inicial de cada ventana (P) resulta ser uno de los factores más influyentes en la convergencia de los resultados. Sin embargo, durante el análisis de cada ventana, la matriz P se actualiza tiempo por tiempo, y esta actualización depende de la Matriz de covarianza de ruido de proceso (R). Esta matriz define el ruido con que trabaja el algoritmo (como se generan SP ya iniciado el análisis en una ventana). Es menor a la matriz de covarianza inicial por ventana y su grado de desviación determina que tal susceptible al cambio son los parámetros analizados en el algoritmo en cada paso de tiempo. Los SP generados dependen tanto de esta matriz como de la matriz de covarianza inicial por ventana (P). La construcción de la matriz de ruido de proceso es análoga a la matriz de covarianza inicial por ventana (P).

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{f_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\phi_{1,1}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_{1,n}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_{n,n}}^2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Es necesario generar una matriz de covarianza inicial en cada ventana cuyos valores en la diagonal sean pertinentes respecto al parámetro que corresponda. En esto se tiene especial consideración para los casos, dado que la covarianza inicial para todas las ventanas en cada una de estos casos determinará que parámetros son más susceptibles a la variación. El hecho que las formas modales normalizadas iniciales no se tienen a

priori hace imperativo el optimizar estas en el primer caso. Luego en un segundo caso se ocupan como parámetros iniciales. De esta forma, se construye una matriz de covarianza hecha para optimizar las tasas de amortiguamiento y no alterar en gran medida los valores de las formas modales normalizadas para los siguientes casos.

También se requiere construir una tercera matriz, la matriz de ruido de mediciones, conocida como matriz R. Esta matriz representa que tan confiable es el modelo. Supuestamente un modelo dinámico modal debería ser confiable, por lo que se da un valor bastante bajo a las desviaciones en este caso. La construcción de esta matriz es similar a los casos anteriores, las desviaciones al cuadrado en la diagonal.

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{f_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\phi_{1,1}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_{1,n}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_{n,n}}^2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

En el contexto del análisis por ventanas se optimizan los parámetros para que ajusten la respuesta lo más posible en cada una de ellas. En ese sentido es importante recalcar que, si la ventana de datos es muy pequeña, es posible que el algoritmo no llegue a optimizar totalmente los parámetros, sobre todo si la matriz de covarianza que genera los SP es muy pequeña.

Además, se debe tener en cuenta el traslape entre ventanas que se quiera realizar. Los parámetros iniciales de cada ventana corresponderán a los de la variación lineal generada entre las ventanas. Esta variación sería hecha entre los valores optimizados entre una ventana y la siguiente. La idea es no generar un salto en la variación de los parámetros (Hernández, Astroza, Beltrán, & Mercado, 2008).

En la siguiente **Figura 3-1** se representa como se genera este cambio lineal entre ventanas con traslape entre ellas.

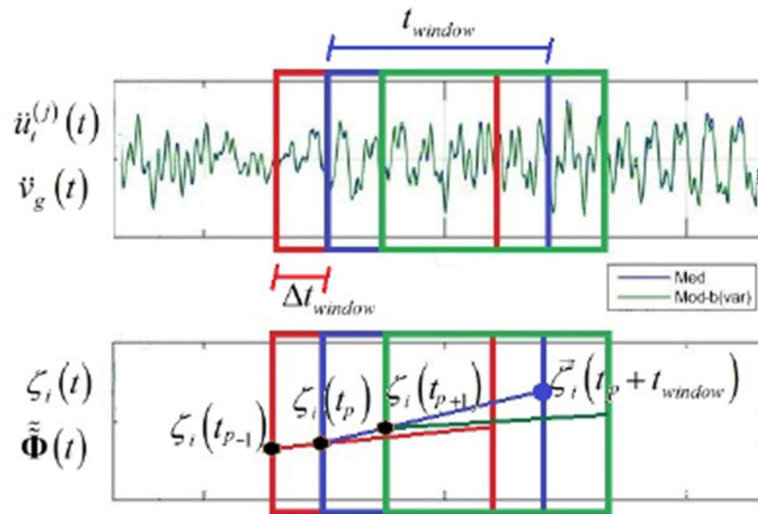


Figura 3-1: interpolación entre ventanas (Hernández et al., 2008)

Al hacer este tipo de análisis por ventana se puede tener obtener un matriz de los parámetros en el tiempo y como estos van variando en este. Finalmente se puede analizar la respuesta para los parámetros en el tiempo y compararla con la de las mediciones iniciales. De esta forma analizar que tan bien se ajusta el modelo y la optimización.

Luego de realizar la optimización bayesiana con los registros puede que sea necesario modificar los parámetros iniciales de optimización, en particular las formas modales, ya que estas presentarían cierta convergencia y un cambio en el MAC. Lo que indicaría que es necesario corregir el parámetro y reiniciar el algoritmo. El hecho de agregar casos permite agregar un criterio de corrección a los valores iniciales previo reinicio del algoritmo, así como también optimizar con una matriz de covarianza diferente para cada caso. En la práctica resulta útil realizar varias optimizaciones con diferentes matrices de covarianza y de esta forma observar cual presenta el mejor resultado.

3.1 Esquema general funcionamiento algoritmo

Tener en cuenta que una vez que finaliza la optimización, se pueden modificar los criterios iniciales de acuerdo a los resultados obtenidos. Para este trabajo de título nos referimos a esto como las iteraciones o casos. Normalmente las optimizaciones en cada registro cuentan con 2 o 3 iteraciones. Un esquema detallado del funcionamiento se puede apreciar en la **Figura 3-2**.

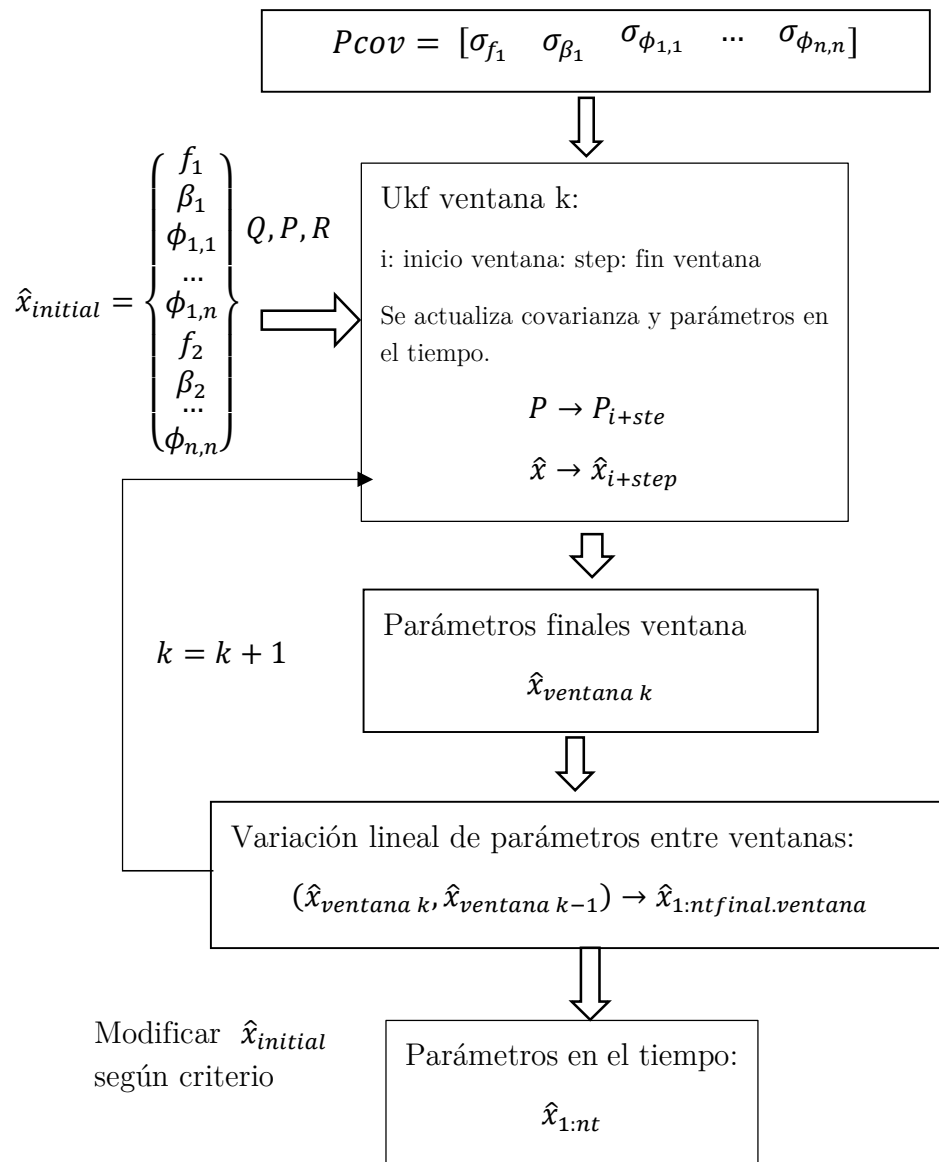



Figura 3-2: Esquema optimización Filtro de Kalman



Normalmente los criterios con el cual se modifican los parámetros iniciales no tienen relación con la frecuencia o amortiguamiento inicial, sino más bien con las formas modales. Si se observa un cambio considerable en el MAC de las ciertas formas modales, respecto al inicio y final de la optimización, es probable que se requiera modificar las formas modales correspondientes.

4 Algoritmo de optimización mediante Newton-Raphson

El algoritmo de optimización utilizado en este trabajo de título comprende minimizar una función de error para ajustar las frecuencias y tasas de amortiguamiento. La clave está en como representar el error de lo calculado respecto a lo medido. En ese sentido, para el cálculo de frecuencia se comparan la transformada de Fourier para cada ventana del registro y se calcula la diferencia entre lo modelado y lo medido. Mientras que el amortiguamiento se compara el valor en sí.

Es clave que esta minimización sea por bloques, es decir, primero optimizar frecuencias y luego optimizar amortiguamientos, como vemos en la **Figura 4-1**.

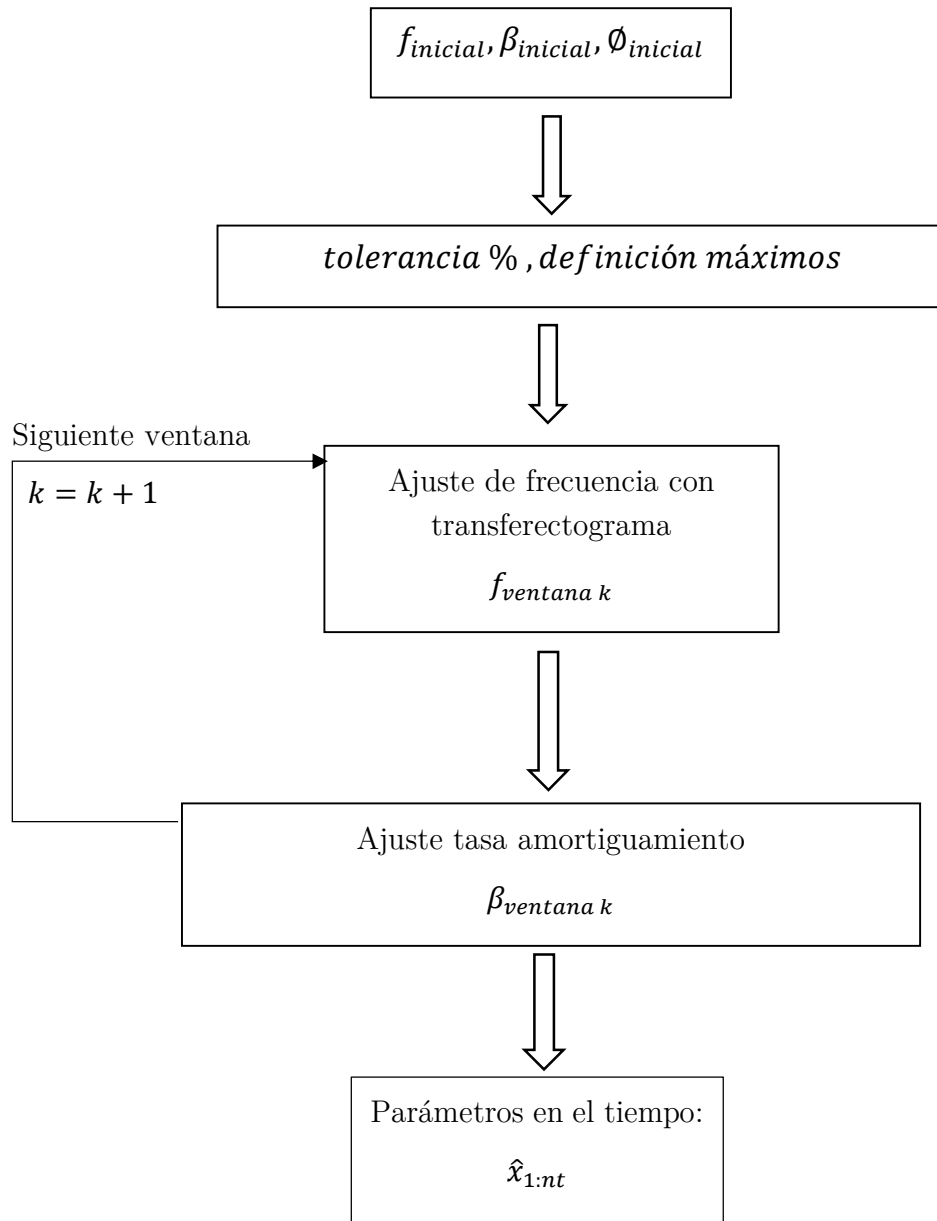


Figura 4-1: Esquema optimización Newton-Raphson

En si esta optimización es más simple y permite trabajar con diferentes tamaños de ventana, resulta clave que se optimicé en bloques y que dentro de esto sea la frecuencia lo primero en ajustar en la ventana. De otra forma, se observarían las mismas inconsistencias y compensaciones entre las tasas de amortiguamiento y las frecuencias.

5 Análisis modelo teórico

El en contexto de este trabajo de título, y como manera de visualizar como opera en la practica el filtro de Kalman, se analizará un modelo teórico con parámetros dinámicos variantes e invariantes en el tiempo.

Supongamos los siguientes parámetros dinámicos de entrada en un modelo modal simple de 5GDL presentados en la **Tabla 5-1**.

Tabla 5-1: Parámetros invariantes modelo teórico

	Periodo [Hz]	Amortiguamiento [-]	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$
Modo 1	1.2	0.03	1.00	-0.52	-0.92	0.63	1.03
Modo 2	4.0	0.04	1.00	-1.33	-0.62	1.85	-0.03

Mientras tanto, el ancho de ventana de definirá de 2.5 segundo con 0.5 segundos de traslape entre ellas. El paso del algoritmo será de 5 unidades de tiempo (con 200 Fs sería en este caso de 0.025 segundos).

El registro con el cual será analizado será en CNP100. El cual es también el caso más estudiado en este trabajo de título.

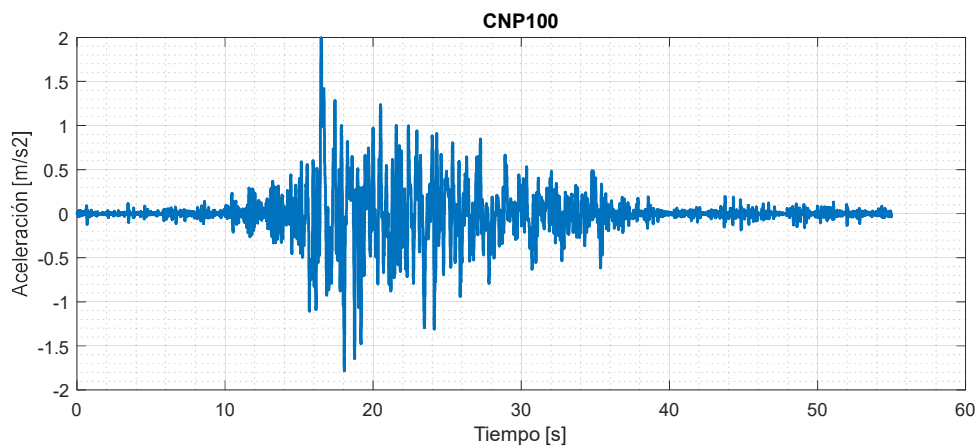


Figura 5-1: Registro CNP100

Si suponemos una respuesta con parámetros invariantes en el tiempo, se observa la siguiente respuesta para cada canal

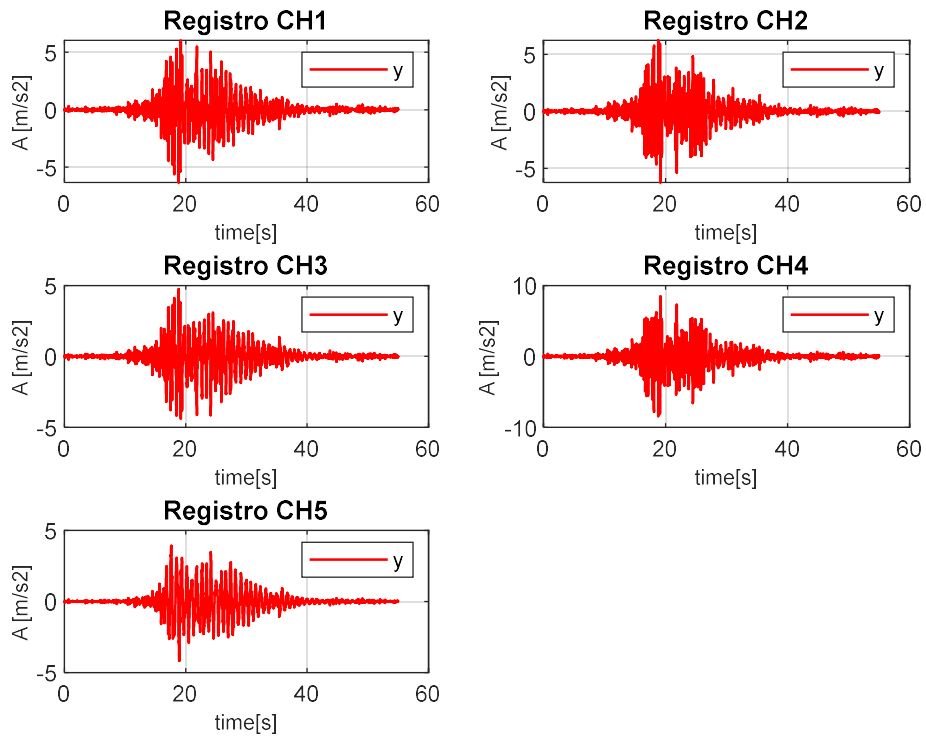


Figura 5-2: Respuesta con parámetros totalmente invariantes en el tiempo.

Ahora, supongamos que agregamos una variación en la frecuencia del primero modo, lo que deja una frecuencia en el tiempo de como en la **Figura 5-3**:

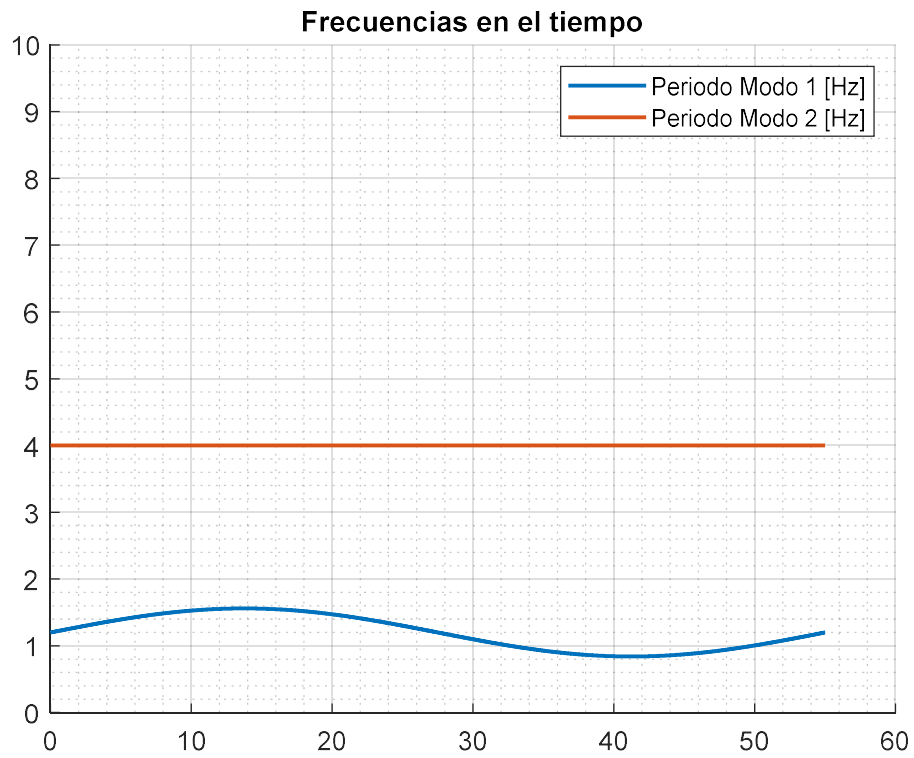


Figura 5-3: Frecuencias variantes en el tiempo caso teórico

Básicamente a la frecuencia del primer modo se le agregó una perturbación sinusoidal de periodo igual a la duración del registro y de 30% de amplitud del valor inicial de la frecuencia.

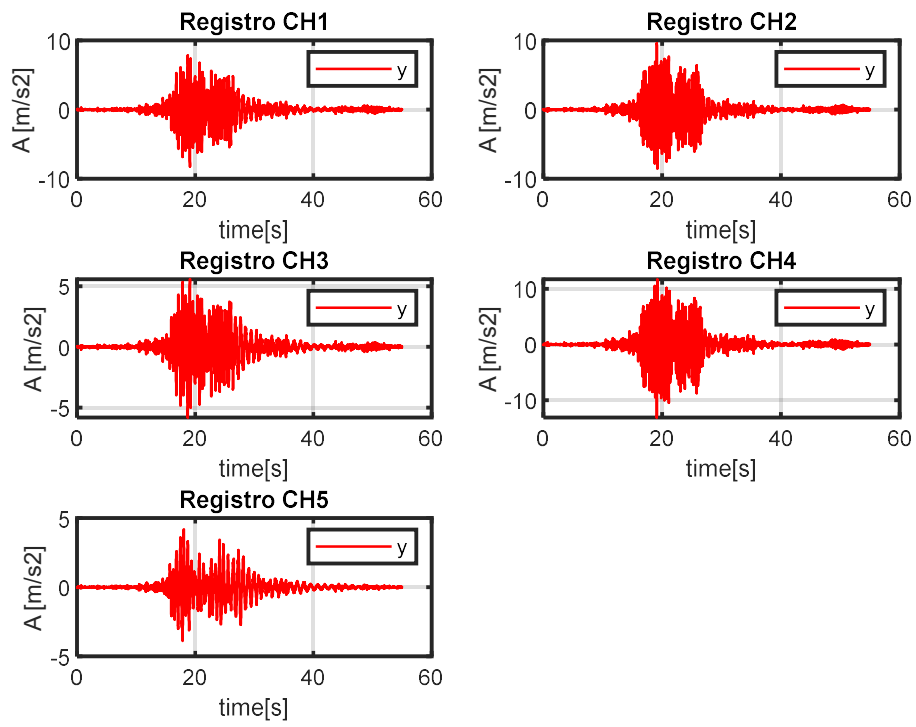


Figura 5-4: Respuesta modelo teórico con frecuencia variable en el primer modo, registro CNP100

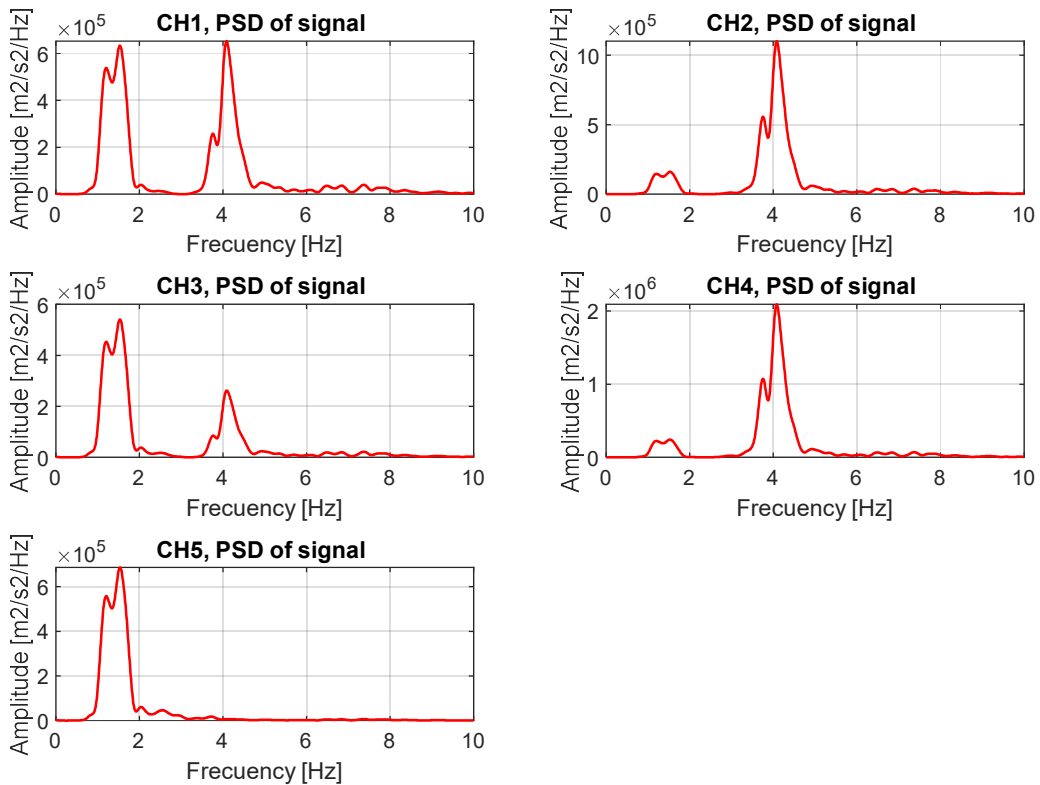


Figura 5-5: PSD mediciones modelo teórico, registro CNP100

Se debe tener en cuenta que este modelo teórico es solo un ejemplo y con valores completamente al azar, la idea es solo analizar como los filtros de Kalman son capaces de identificar los cambios de frecuencia y demás parámetros ventana a ventana.

Se somete entonces al algoritmo a analizar el modelo teórico y a optimizar los parámetros dinámicos de este, donde en estricto rigor debiese seguir la variación sinusoidal de la frecuencia del primer modo. Dadas estas condiciones impuestas, es prácticamente innecesario optimizar las formas modales y tasas de amortiguamiento, por lo que podemos utilizar un muy bajo grado de desviación en la matriz P para estos parámetros. Únicamente dar mayor covarianza a la frecuencia del primer modo.

El hecho de conocer los resultados a priori del comportamiento permite tener una clara idea de cómo construir la matriz de covarianza para este caso. Para un caso real, sería un proceso algo más tedioso de ir ajustando la covarianza y probar con diferentes desviaciones para cada parámetro hasta llegar a un set de desviaciones que funcione óptimamente. En ciertos casos los mecanismos de daño de algunos sistemas estructurales pueden producir bruscos cambios en las tasas de amortiguamiento o frecuencias. Esto se traduciría en la práctica a tener que construir una matriz de

covarianza de mucha desviación. El hecho que los SP sean generados dentro de esos ordenes puede generar falsas correcciones entre amortiguamiento y frecuencias, sobre todo cuando el movimiento decae al final del ensayo.

$$P = \begin{bmatrix} 0.01^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Por otro parte, la matriz de ruido de proceso es tiene los mismos valores en toda la diagonal.

$$Q = \begin{bmatrix} (1 \cdot 10^{-5})^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1 \cdot 10^{-5})^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1 \cdot 10^{-5})^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1 \cdot 10^{-5})^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1 \cdot 10^{-5})^2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Luego los resultados de las frecuencias optimizadas se presentan en la **Figura 5-6**.

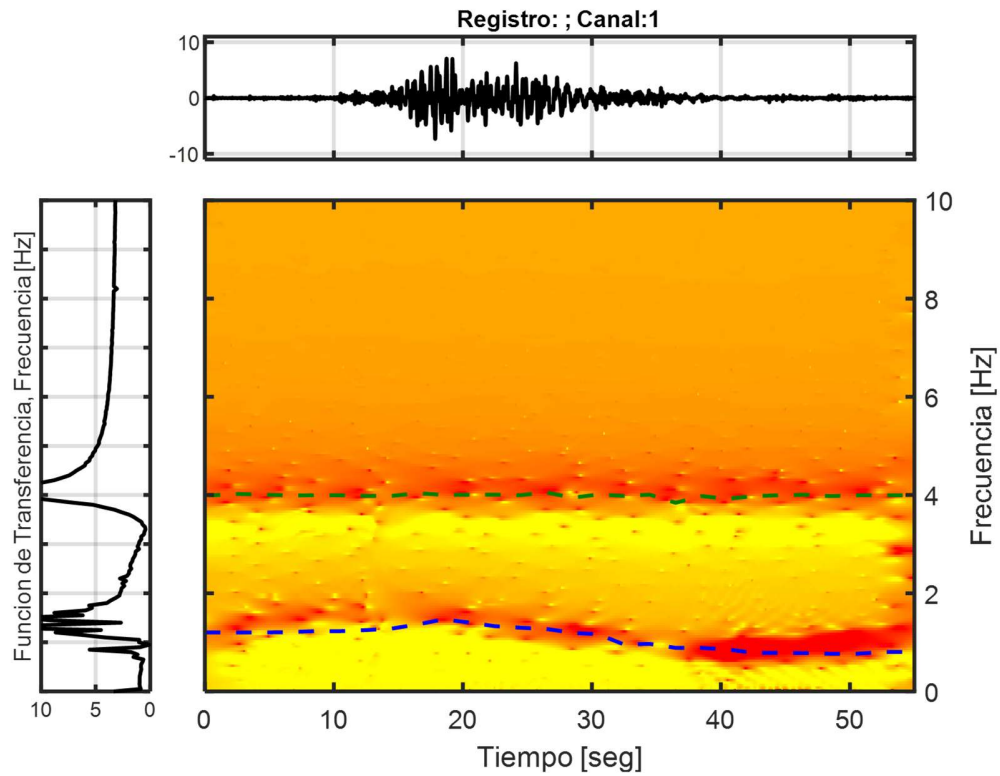


Figura 5-6: Espectrograma modelo teórico con frecuencia variable en el primer modo, registro CNP100

Se puede observar que el algoritmo tiende a seguir la frecuencia del transferectograma con cierta imprecisión en el inicio, la cual probablemente se relacione con que aún no existe movimiento intenso. Debido a esto es necesario utilizar la intensidad de Arias, y así definir el rango donde se encuentra el 5% y 95% de la energía del sismo. En la **Figura 5-7** se puede apreciar como las frecuencias cambian en el tiempo dentro y fuera de estos rangos que define la IA.

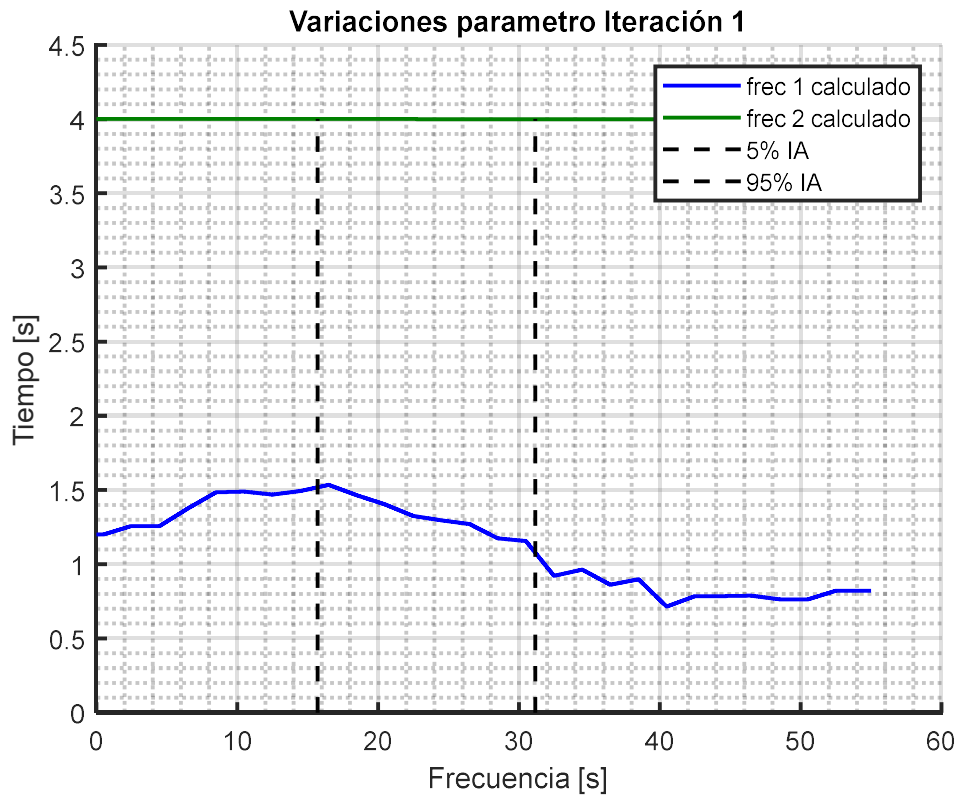


Figura 5-7: Frecuencia en el tiempo e IA (CNP100 FB)

Por otra parte, dado que se dio una muy pequeña covarianza al amortiguamiento, estos apenas tendrán variación (**Figura 5-8**). Si no fuese así, es probable que se hubiesen observado compensaciones entre la tasa de amortiguamiento y la frecuencia.

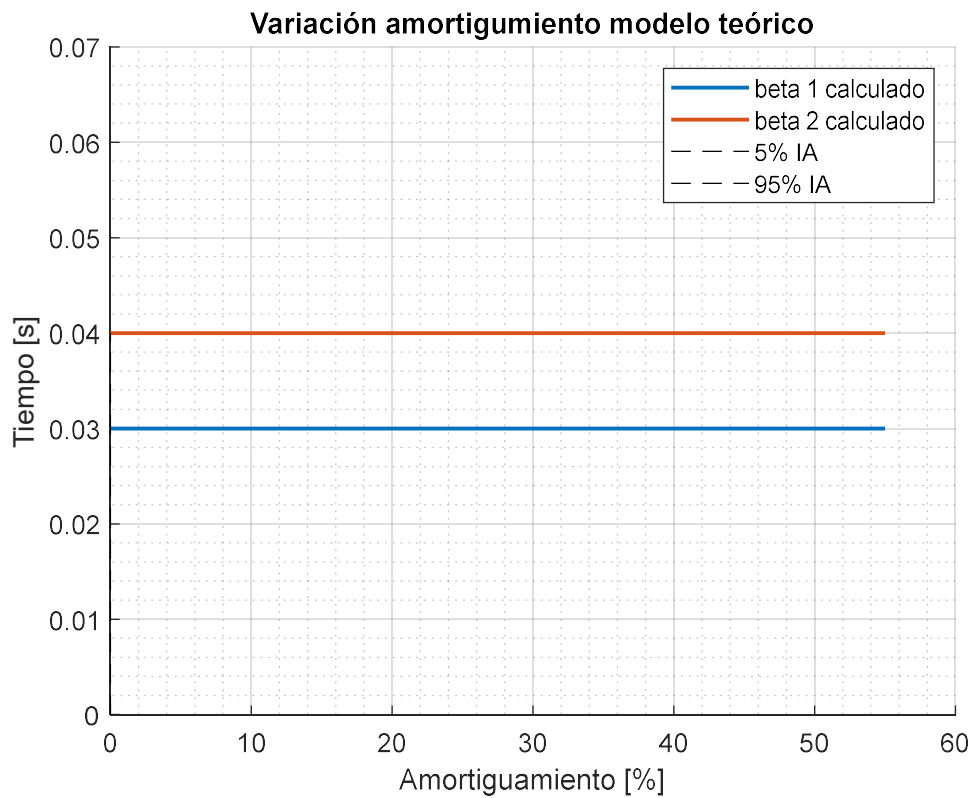


Figura 5-8: Variación amortiguamiento en el tiempo modelo teórico (CNP100 FB)

Además, presentaremos en **Figura 5-9** la variación del MAC en el tiempo, el cual debiese ser prácticamente nulo por la misma razón que el amortiguamiento; una covarianza muy pequeña. De esta forma se asegura en gran medida que la optimización con UKF concentre la optimización en la frecuencia del primer modo.

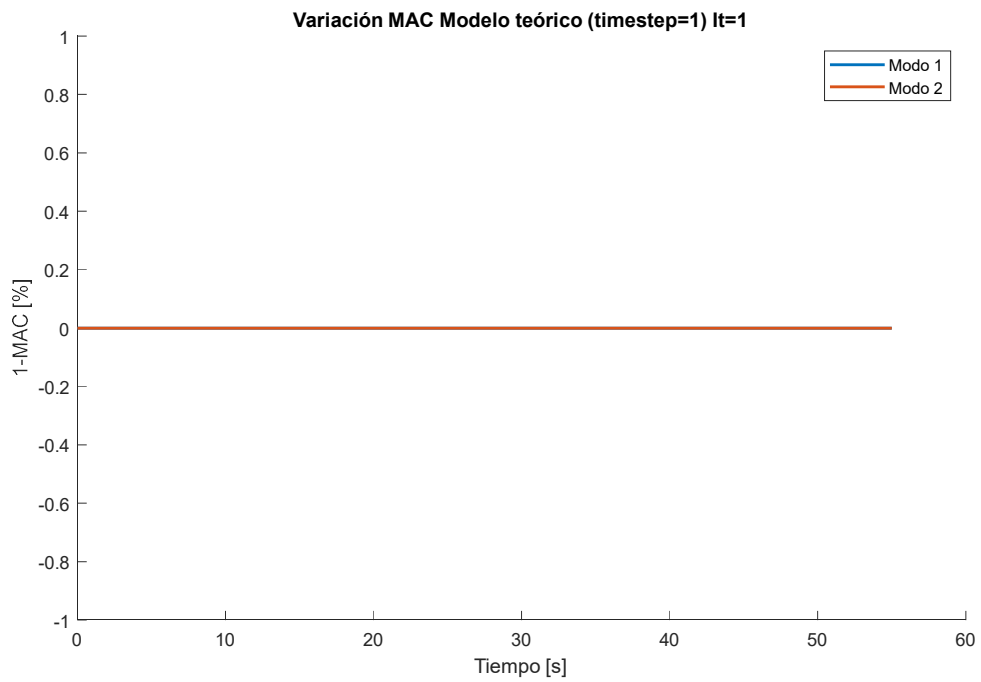


Figura 5-9: Variación MAC canal modelo teórico (CNP100 FB)

No es de extrañar estos últimos resultados considerando la baja desviación que se dio para las formas modales.

La comparación entre la respuesta medida y calcula se puede observar en **Figura 5-10**.

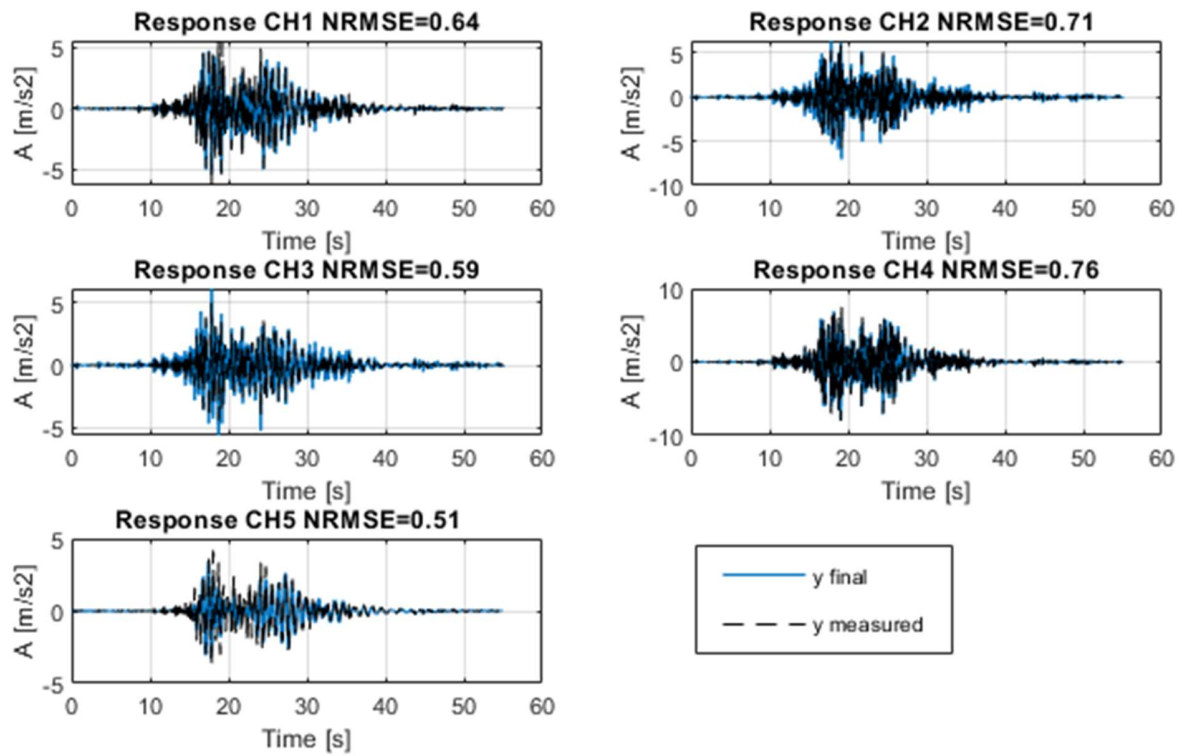


Figura 5-10: Respuesta cada canal modelo teórico (CNP100)

Si bien existe mucha diferencia respecto a cada canal, la respuesta se ajusta de buena manera a las mediciones generadas por el modelo teórico. Dado que las formas modales fueron prácticamente al azar se aprecian participaciones muy diferentes del primer y segundo modo para cada canal. Como se observa en el PSD **Figura 5-5**.

6 Descripción estructura en estudio Edificio BNCS – Universidad de California, San Diego

6.1 Datos Generales

El Edificio BNCS es un modelo a escala real sobre una mesa de vibrar que permite reproducir diversos sismos. Fue construido con el propósito de monitorear y obtener datos experimentales que representen un comportamiento más real de un edificio ante un evento sísmico.

En la **Figura 6-1** se muestra que el edificio BNCS posee 5 pisos, con una planta **11 m x 6,6 m** en dirección longitudinal y transversal respectivamente. La altura total es de **21,34 m**, considerando parte superior fundación hasta parte superior losa del techo. La altura de piso es constante de **4,27 m**.

Las masas consideradas dependen de la configuración; en el caso de base aislada se asumen en el primer nivel un peso de 1870 [kg] mientras que en los otros pisos 884 [kg]. Mientras tanto en el caso de base fija se asumen una distribución idéntica en cada piso con 884 [kg].

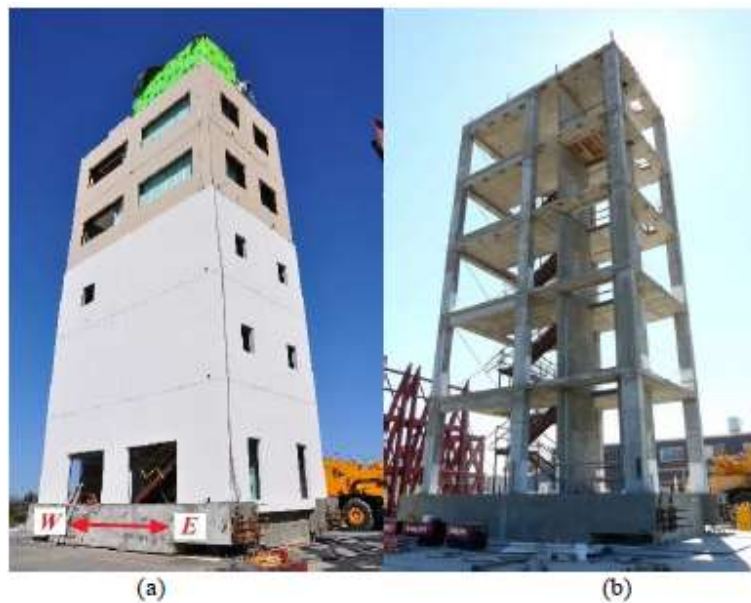


Figura 6-1: Edificio BNCS (a) estructura con recubrimiento (b) estructura sin recubrimiento

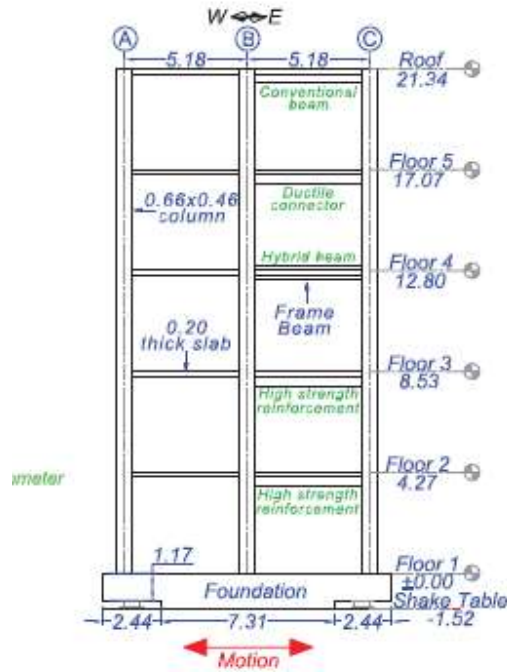


Figura 6-2: Edificio BNCS, vista en elevación

La estructura se sostiene sobre una fundación de hormigón post-tensados para las dos configuraciones (Base Fija y Base Aislada). La fundación tiene una altura de 1.5 m y está construida directamente sobre la mesa vibradora. En el lado norte y sur de la fundación existen unos espacios necesarios para aislar la estructura, los cuales reducen el alto de la fundación a 1.2 metros en ambos costados.



Figura 6-3: Edificio BNCS (a) estructura con recubrimiento (b) estructura sin recubrimiento

6.2 Aisladores Sísmicos

El sistema de aislación consistió de 4 aisladores de alto amortiguamiento (HDRBs). Fueron colocados en cada esquina inferior de la fundación. La altura de estos es de $0,34\text{ m}$ de altura y se componen de 34 capas de caucho de 6 mm de espesor y 33 capas de placas de acero de 3 mm de espesor. Además, en la parte superior e inferior del aislador se colocan placas de 20 mm de espesor. El diámetro exterior es de 0.65 m mientras que el interior es de 0.10 m .

Las dimensiones del aislador sísmico se pueden apreciar en la Figura 6-4.

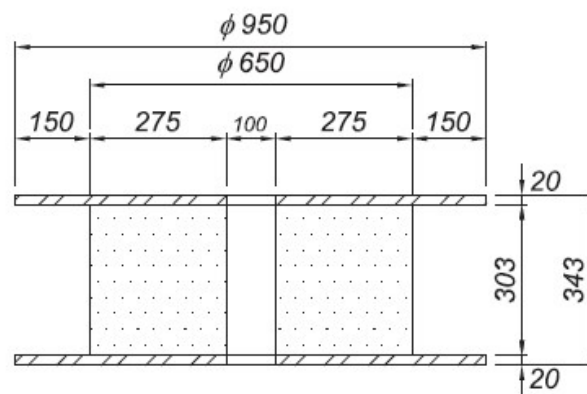


Figura 6-4: Dimensiones Aislador sísmico Edificio BNCS

En la Figura 6-5 se observa una visión más general de un aislador.



Figura 6-5: Imagen Aislador sísmico

6.3 Instrumentación

Para el experimento se incluyó una robusta instrumentación que comprendió acelerómetros, potenciómetros y Strain Gauges con el propósito de obtener diversos tipos de respuestas estructurales. En cada uno de los pisos fueron colocados 4 acelerómetros triaxiales.

Los acelerómetros utilizados corresponden a los Episensor. Estos operan en un rango de ± 4 g, con un ancho de banda de frecuencia DC-200Hz y un rango dinámico de 155 dB. La frecuencia de muestreo fue de 200 Hz. Las mediciones de aceleración se filtraron utilizando un filtro pasa banda Butterworth de respuesta al impulso infinita, de orden 4 con frecuencia de corte de 0,04 Hz y 25 Hz.

En la siguiente figura se puede apreciar la disposición de la instrumentación.

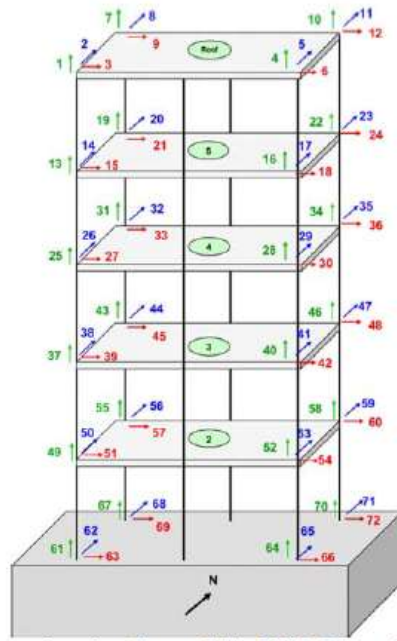


Figura 6-6: Disposición sensores (1-72)

6.4 Protocolo de ensayos

Se aplicaron una serie de registros en la mesa vibratoria que comprenden desde ruidos blancos de diversa amplitud, vibraciones ambientales y ensayos sísmicos. Naturalmente, fueron aplicados secuencialmente según su orden de magnitud.

En la siguiente se puede apreciar las fechas de los ensayos sísmicos. Primero se realizó el caso aislado y luego en de Base fija-

Tabla 6-1: Orden cronológico de ensayos sísmicos

Fecha	Evento Sísmico – Sitio – Escala [%] – Tipo de Base	Nombre
Abril 16, 2012	1994 Northridge – Canoga Park – 100 [%] – BA	BI1-CNP100
Abril 16, 2012	1994 Northridge – LA City Terrace – 100 [%] – BA	BI2-LAC100
Abril 17, 2012	1994 Northridge – LA City Terrace – 100 [%] – BA	BI3-LAC100 2
Abril 17, 2012	2010 Maule (Chile) – San Pedro – 100 [%] – BA	BI4-SP100
Abril 26, 2012	2007 Pisco (Perú) – Ica – 50 [%] – BA	BI5-ICA50
Abril 27, 2012	2007 Pisco (Perú) – Ica – 100 [%] – BA	BI6-ICA100
Abril 27, 2012	2007 Pisco (Perú) – Ica – 140 [%] – BA	BI7-ICA140
Mayo 7, 2012	1994 Northridge – Canoga Park – 100 [%] – BF	FB-CNP100
Mayo 9, 2012	1994 Northridge – LA City Terrace – 100 [%] – BF	FB-LAC100
Mayo 9, 2012	2007 Pisco (Perú) – Ica – 50 [%] – BF	FB-ICA50
Mayo 11, 2012	2007 Pisco (Perú) – Ica – 100 [%] – BF	FB-ICA100
Mayo 15, 2012	2002 Denali – TAPS Pump Station #9 – 67 [%] – BF	FB-DEN67
Mayo 15, 2012	2002 Denali – TAPS Pump Station #9 – 100 [%] – BF	FB-DEN100

7 Análisis de resultados

7.1 Registro aceleraciones

Se presentan a continuación las mediciones de cada uno de los registros, para los canales analizados. Los canales analizados para los primeros cálculos en 2D fueron: 6,18,30,42 y 54 en los casos de base fija y 6,18,30,42,54 y 66 en los casos de base aislada. Se puede observar la distribución de estos en la **Figura 6-6**.

Tabla 7-1: Canales utilizados caso base fija

Canal original (en estructura)	Canal en algoritmo
Channel 6	CH1
Channel 18	CH2
Channel 30	CH3
Channel 42	CH4
Channel 54	CH5

Tabla 7-2: Canales utilizados base aislada

Canal original (en estructura)	Canal en algoritmo
Channel 6	CH1
Channel 18	CH2
Channel 30	CH3
Channel 42	CH4
Channel 54	CH5
Channel 66	CH6

Durante este capítulo se prestará especial atención al caso con CNP100 FB y el DEN67 FB ambos para el caso de base fija. Mientras tanto, para el caso de base aislada se analizará primordialmente los casos CNP100 y ICA50. Los demás resultados, se podrán ver en los Anexos.

El caso CNP100 FB fue el que arrojó menor grado de error entre la respuesta calculada y la medida. Tiene la particularidad de presentar un movimiento fuerte al inicio y ser un registro de corta duración. Las mediciones por canal se pueden observar en la **Figura 7-1**.

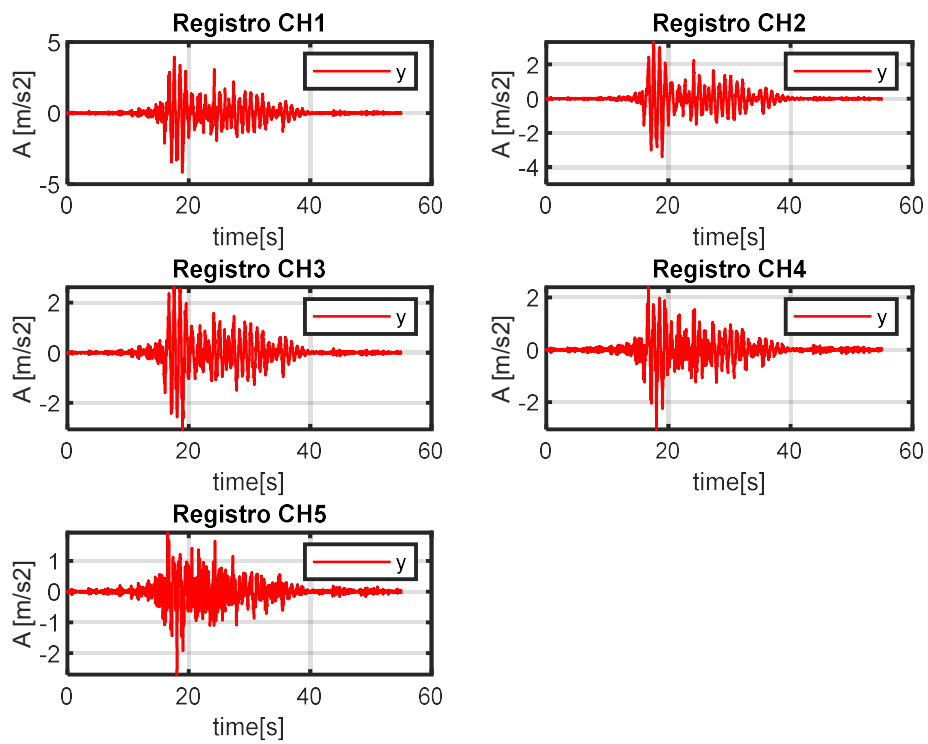


Figura 7-1: Registro aceleraciones cada canal (CNP100 FB)

Mientras tanto, las mediciones para el otro caso de base fija que se dará atención en este capítulo, el DEN67 FB se presentan en la **Figura 7-2**.

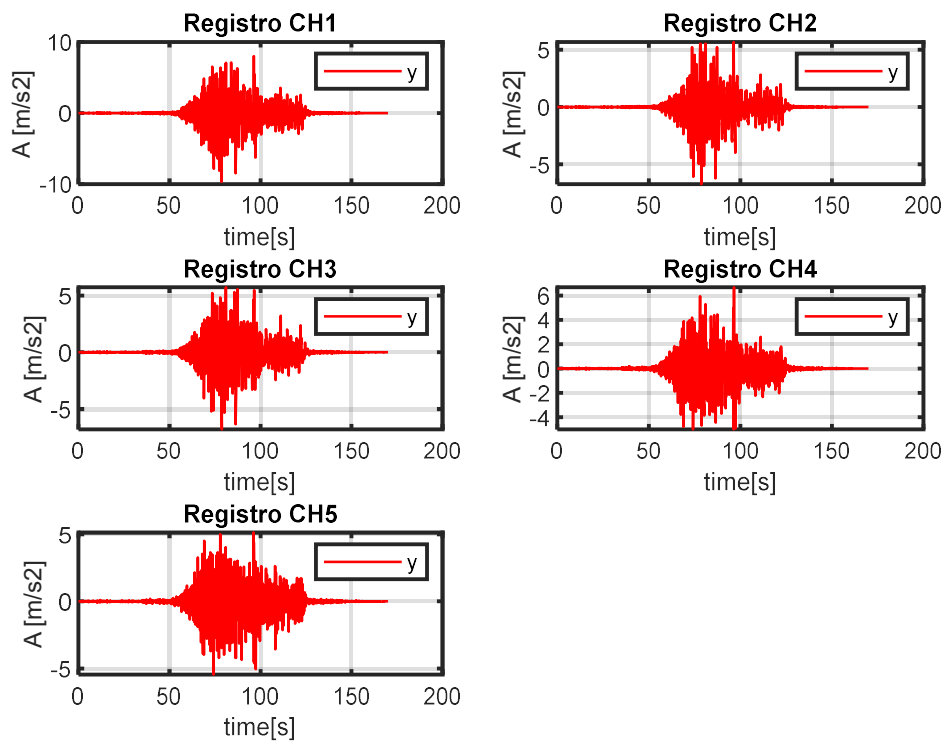


Figura 7-2: Registro aceleraciones cada canal (DEN67 FB)

Por otra parte, las mediciones para base aislada son los presentados en las **Figura 7-3** y **Figura 7-4**.

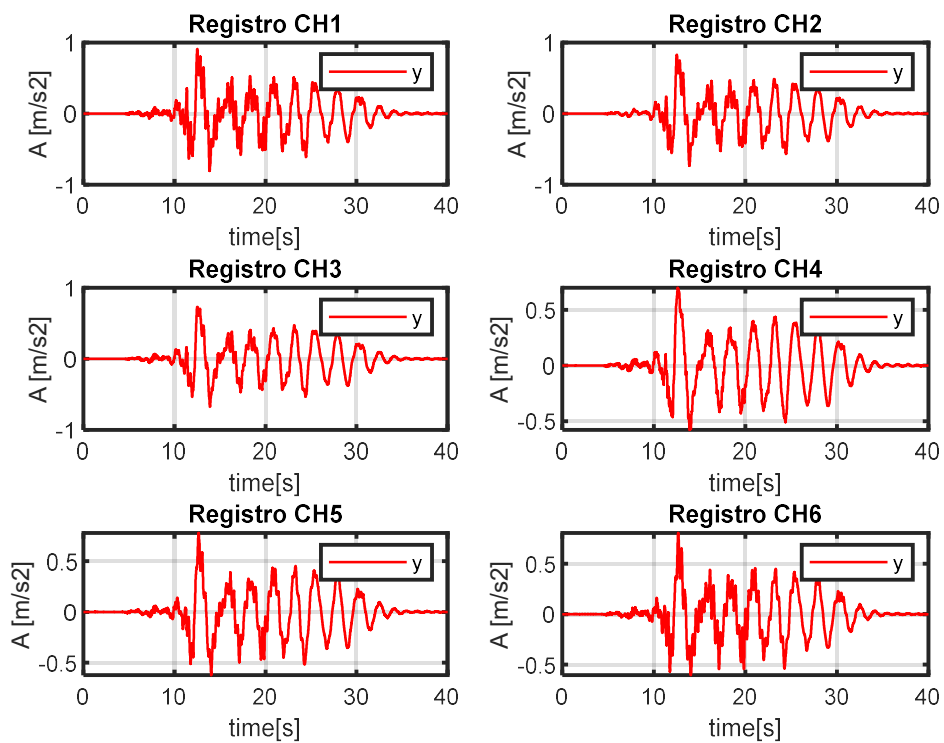


Figura 7-3: Registro aceleraciones cada canal (CNP100 BI)

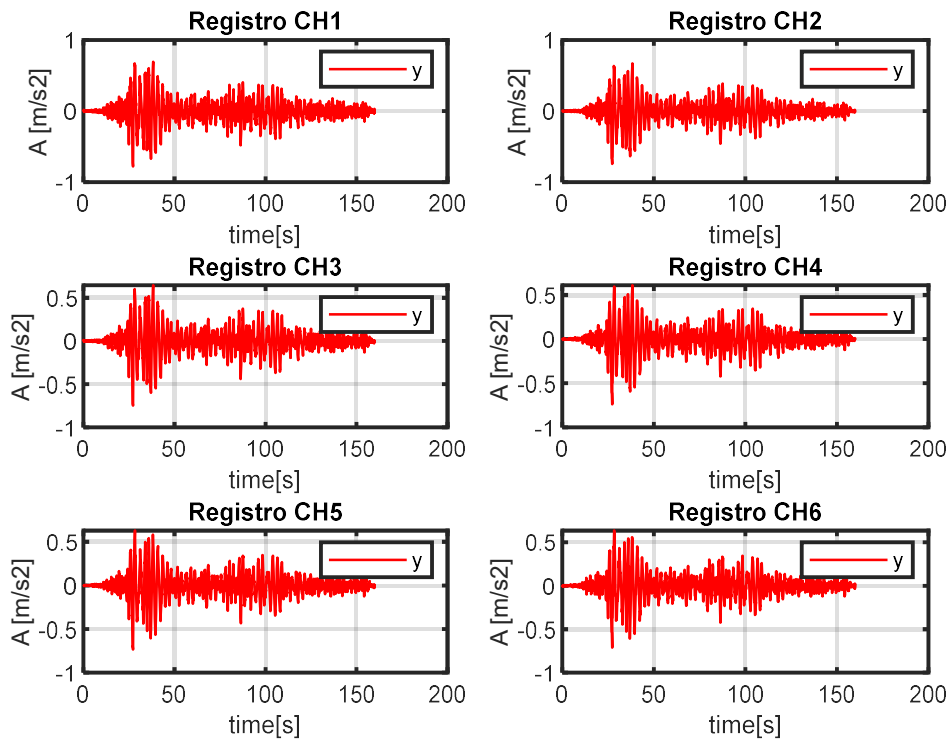


Figura 7-4: Registro aceleraciones cada canal (ICA50)

Al comparar ambos casos CNP100 se puede observar a simple vista que los casos de base aislada se presenta un modo fundamental de una frecuencia mucho menor, donde los aisladores añaden un notorio grado de flexibilidad al movimiento de la estructura.

7.2 Definición de frecuencias, amortiguamiento y formas modales iniciales

7.2.1 Frecuencias fundamentales iniciales

Para el inicio del algoritmo se pueden utilizar DSI por pequeñas ventanas para obtener las frecuencias y formas modales de los 3 primeros modos. Normalmente se trabajó con tres modos para los casos de base fija y dos modos para los casos de base aislada. Esto se debe a que en los casos de base aislada la participación del 3 modo es muy leve, lo que al final se traduce en inconsistencias en el cálculo con filtro de Kalman. En la Tabla 7-11 se indican las frecuencias obtenidas para los diferentes registros para los modos 1,2 y 3.

Tabla 7-3: Frecuencias identificada DSI pequeñas ventanas casos base fija

Registro	Modo 1 [Hz]	Modo 2 [Hz]	Modo 3 [Hz]
CNP100 FB	1.6	6.6	10.7
ICA50 FB	1.6	6.6	10.7
ICA100 FB	1.4	6	10
DEN67 FB	1.3	5.4	9.6
DEN100 FB	0.87	4.1	7.7

Se puede apreciar que en cada ensayo consecutivo se presenta una degradación estructural que se manifiesta en una disminución de los periodos en los primeros modos.

Análogo a lo anterior, se presenta en la **Tabla** 7-12 las frecuencias identificadas para los casos de base aislada

Tabla 7-4: Frecuencias identificadas casos base aislada

Registro	Modo 1 [Hz]	Modo 2 [Hz]	Modo 3 [Hz]
CNP100	1	3.5	6.9
ICA50	1.3	3.4	7.8
ICA100	1.4	3.2	6.9
ICA140	1	3.4	6.9
LAC100	1	3.2	6.9

7.2.2 Formas modales iniciales

Con el diagrama de estabilidad obtenido mediante DSI, se obtienen los modos fundamentales y sus formas modales asociadas. De esta manera para el caso CNP100 FB las formas modales se presentan en la **Figura 7-5**.

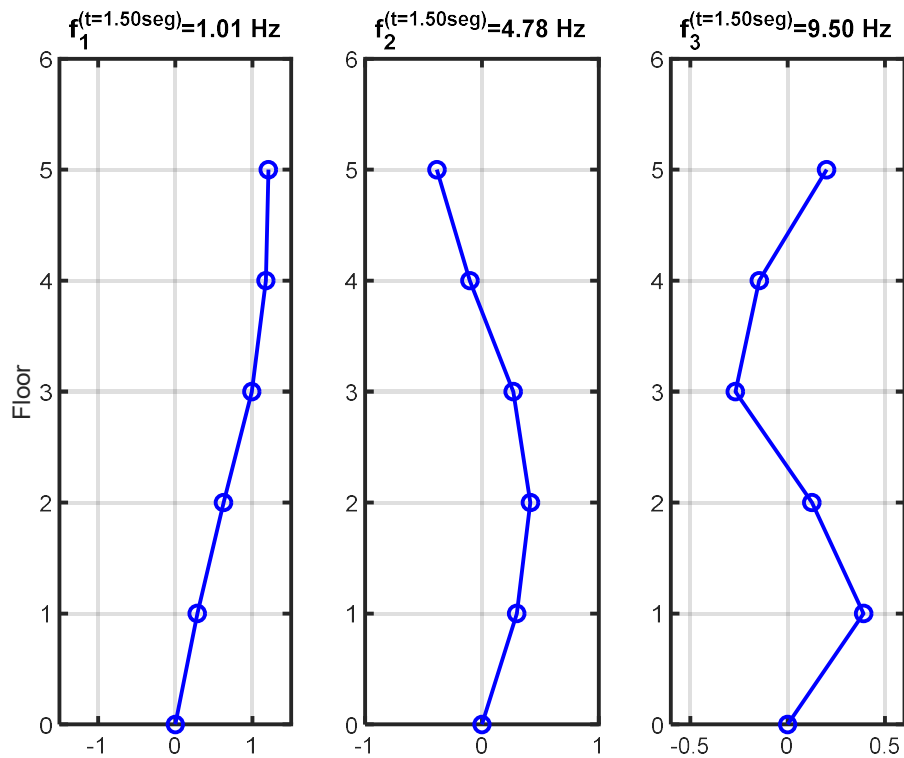


Figura 7-5: Formas modales CNP100 FB

Es importante recordar que las formas modales están multiplicadas por su factor de participación, es decir, no están normalizadas.

Mientras tanto las formas modales para el caso de base aislada son la presentadas en la **Figura 7-6**.

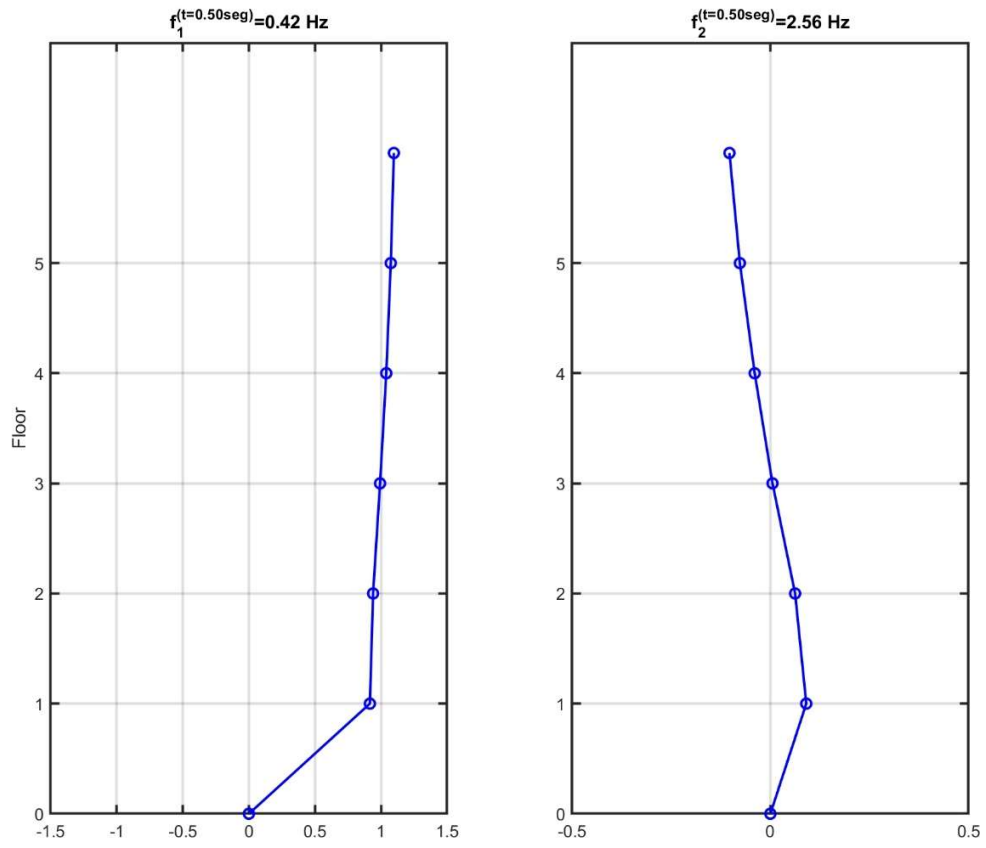


Figura 7-6: Formas modales CNP100 BI

7.3 Definición de covarianza y parámetros fijos de optimización

Hay un gran set de parámetros que deben definirse previo a la optimización. Muchos de estos fueron modificados a medida que se hacían diferentes pruebas, y la mayoría de los casos parecen responder correctamente con ciertas clases de configuración de optimización. Sin embargo, existe una infinidad de combinaciones que se podrían decretar para la construcción de las matrices P, Q y R, así como también para los anchos y traslapes entre ventanas.

En el Marco Teórico de esta memoria se explicó en detalle la influencias que tienen la matriz de covarianza inicial por ventana (P), la matriz de ruido de proceso (Q) y la matriz de ruido de mediciones (R). Para el edificio BNCS de la mesa de San Diego, Caso CNP100 FB base fija, se utilizaron los siguientes grados de desviación presentado en **Tabla 7-5**.

Tabla 7-5: desviación covarianza inicial ventana Caso CNP100 FB

	Frecuencia [s]	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$
Modo 1	0.01	0.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 2	0.02	0.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 3	0.03	0.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Para el caso DEN67 FB se utilizaron las siguientes desviaciones **Tabla 7-6**.

Tabla 7-6: Desviación covarianza inicial ventana Caso DEN67 FB

	Frecuencia [s]	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$
Modo 1	0.02	0.6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 2	0.02	0.6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 3	0.02	0.6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Mientras tanto, para los casos de base aislada, el CNP100 y el ICA50 utilizaron los siguientes grados de desviación presentados en la **Tabla 7-7** y **Tabla 7-8** respectivamente.

Tabla 7-7: Desviación covarianza caso CNP100 BI

	Frecuencia	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$	$\varphi_{6,n}$
Modo 1	0.02	0.4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Modo 2	0.02	0.4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Tabla 7-8: Desviación covarianza inicial ventana Caso ICA50 BI

	Frecuencia	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$	$\varphi_{6,n}$
Modo 1	0.01	0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Modo 2	0.02	0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Los otros casos se pueden observar en anexos.

Por otra parte, el grado de desviación en la matriz Q será el mismo para todos los casos, sean estos de base fija o base aislada.

$$\sigma_Q = 1 \cdot 10^{-5} \quad (3.7)$$

Así mismo la matriz R fue la misma para todos los casos con un grado de desviación muy pequeño.

$$\sigma_R = 1 \cdot 10^{-4} \quad (3.8)$$

Por último, los anchos y traslapes de ventanas se presentan a continuación en **Tabla 7-9**

Tabla 7-9: Anchos y traslapes de ventana casos base fija

	Ancho ventana [s]	Traslape [s]	Step [s]
CNP100 FB	2.5	2	0.025
ICA50 FB	2.5	2	0.025
ICA100 FB	2.5	2	0.025
DEN67 FB	2	1.5	0.025
DEN100 FB	2.5	1.5	0.025

En general el ancho y traslape de ventana en los casos de base fija son idénticos para todos los registros estudiados. Los casos de base aislada presentaron mejores resultados con ventanas algo más particulares en cada caso (**Tabla 7-10**).

Tabla 7-10: Anchos y traslapes casos base aislada

	Ancho ventana [s]	Traslape [s]	Step [s]
CNP100 BI	2.0	1.0	0.025
ICA50 BI	2.0	1.5	0.025
ICA100 BI	2.5	2.0	0.025
ICA140 BI	2.0	1.5	0.025
LAC100 BI	2.5	2	0.025

7.4 PSD de mediciones

Se puede observar que el PSD de las mediciones presenta un dominio muy claro del primer modo. Sobre todo, en los casos de base aislada. Al mismo tiempo el movimiento en los pisos superiores suele presentar, lógicamente, mayor dominio del primer modo, mientras que los canales más cercanos a la base presentan mayores incursiones en modos superiores y frecuencias asociadas a la aceleración de piso. Esto coincide con el grado de flexibilidad que aumenta conforme la altura del edificio.

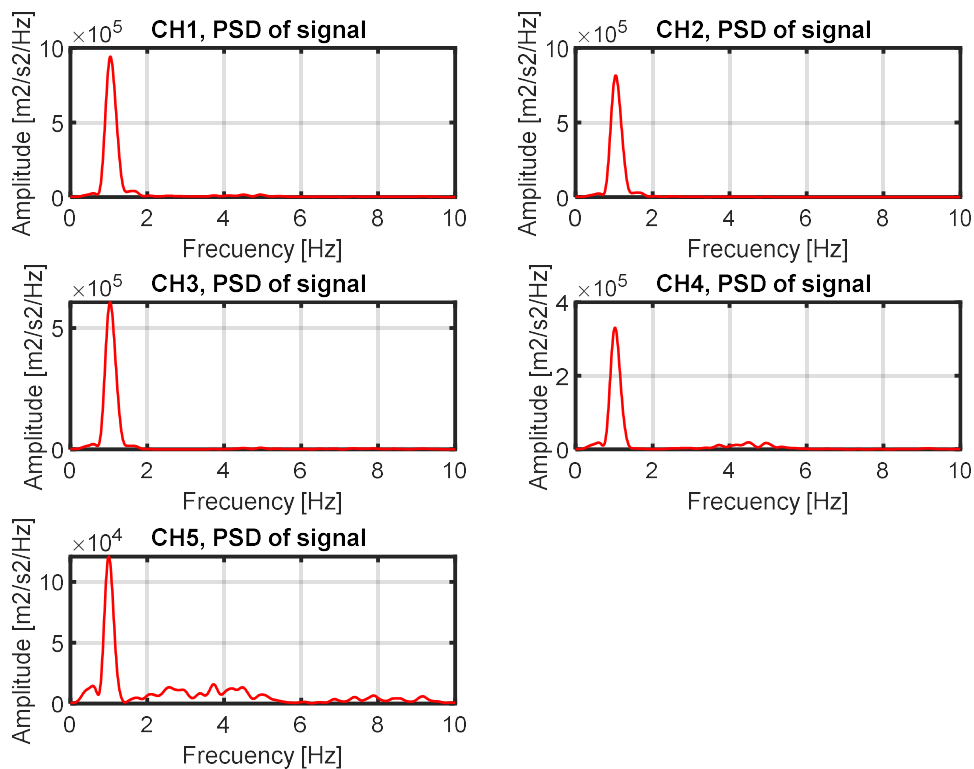


Figura 7-7: PSD caso CNP100 FB

En los casos de base aislada las incursiones en modos superiores son menos perceptibles al observar los PSD, inclusive en los canales más cercanos a la base donde el movimiento es similar al sismo generado por la mesa vibratoria.

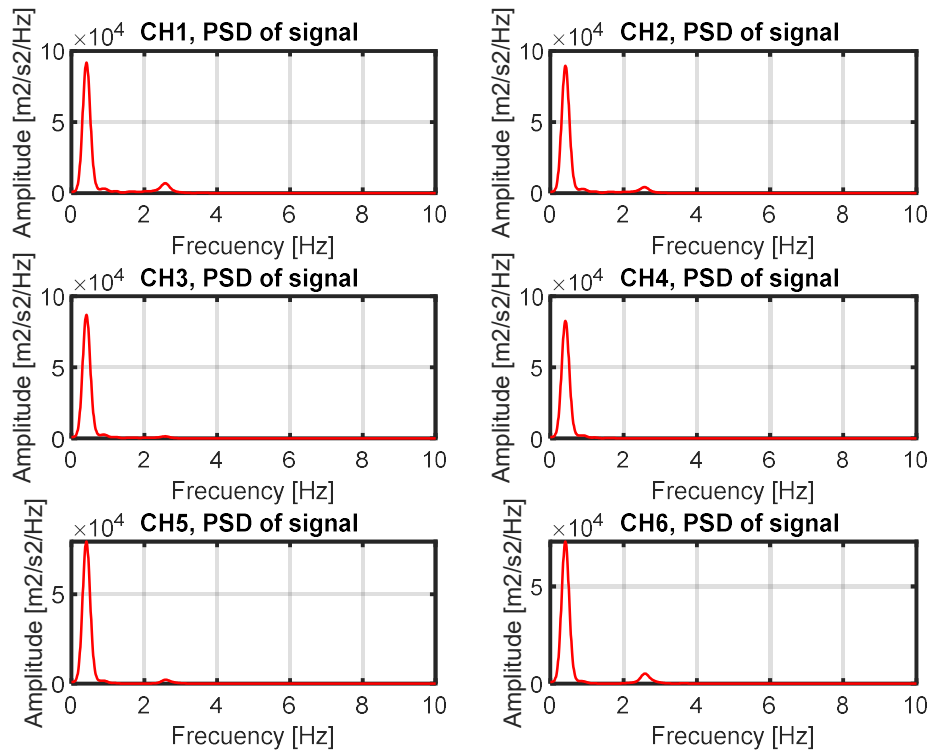


Figura 7-8: PSD caso CNP100

7.5 Respuesta

Hay una gran variación en la precisión de la respuesta calculada dependiendo del caso y el canal. Es normal observar un mayor grado de exactitud para los registros de base fija. Las mayores imprecisiones se encuentran al final del registro donde la covarianza de la frecuencia o tasa de amortiguamiento para el primer modo no es suficiente, o bien es excesiva, lo que conlleva a un mal ajuste de la frecuencia, con una consecuente inconsistencia en el cálculo del amortiguamiento.

Para el cálculo de error entre la respuesta calculada y la medida se utilizó la raíz de la desviación cuadrática media (NRMSE). Los casos más prometedores llegan a un $\text{NRMSE}=0.72\text{-}0.75$. Mientras que la gran mayoría de los registros se adaptaron con un mínimo $\text{NRMSE}=0.45$. Algunos casos menos prometedores presentaron $\text{NRMSE} 0.35$ o menor, en particular los casos de Base Aislada donde se presentaba un mal cálculo de la frecuencia del primer modo.

A continuación, se puede apreciar en mejor detalle cómo se adapta la respuesta en uno de los casos más favorables (Figura 7-9).

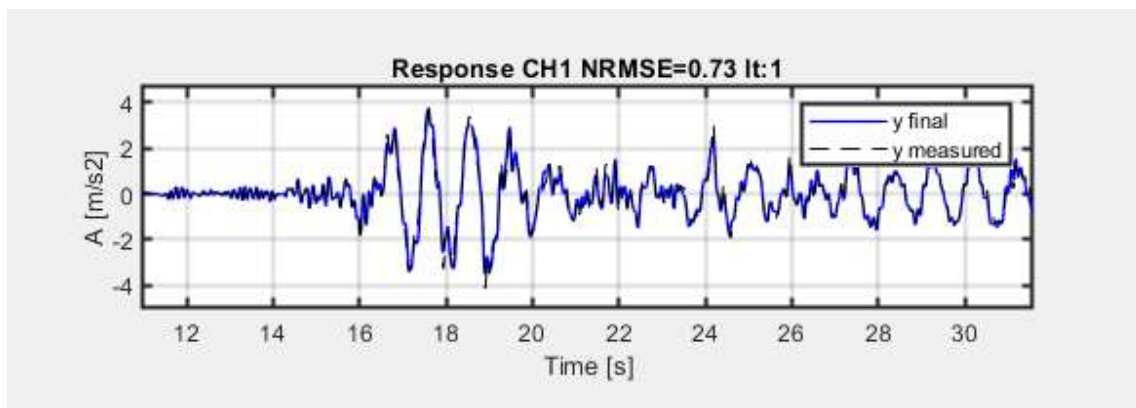


Figura 7-9: Ajuste respuesta canal superior Caso CNP100 FB

En general se obtienen buenos resultados para todos los canales. El resultado final apreciado de manera más general se presenta en la **Figura 7-10** donde se observa la respuesta medida y la respuesta modelada para cada uno de los canales.

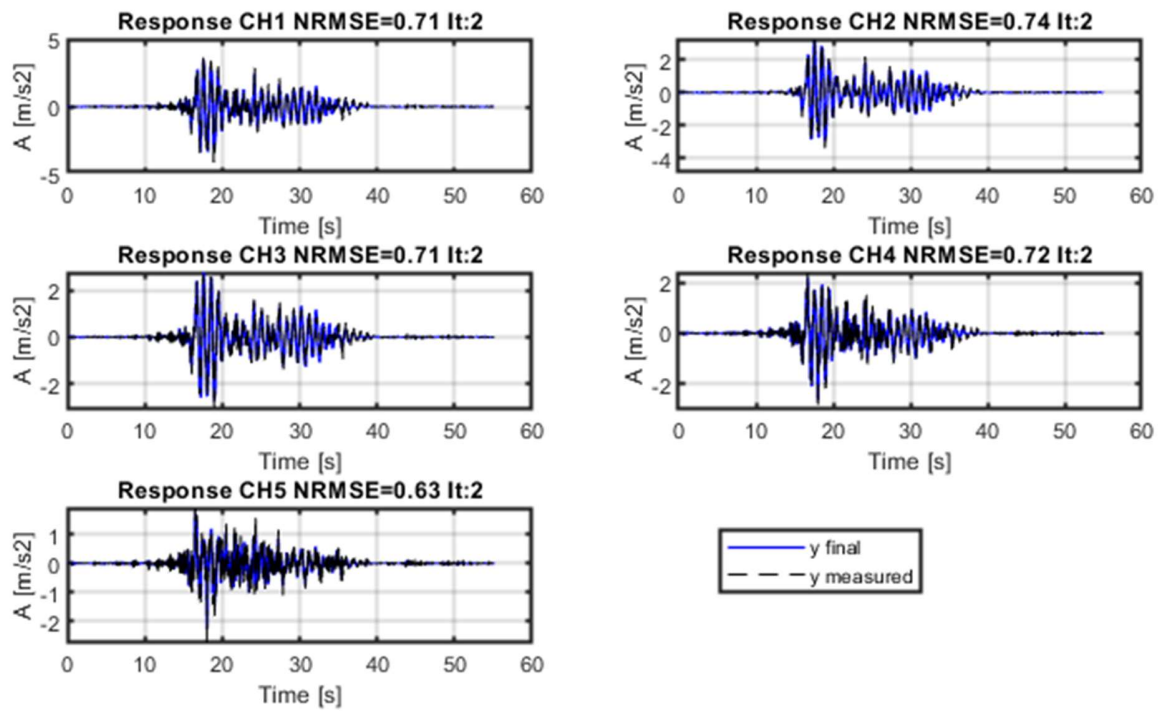


Figura 7-10: Respuesta Calcula UKF CNP100 FB

Veremos que en general las respuesta modelada para la configuración de base fija presenta mejores resultados que los de base aislada, por ejemplo el caso DEN 67 FB (**Figura 7-11**) presenta a simple vista correctos ajustes de frecuencia en el tiempo, sin embargo en las configuraciones de base aislada esto no necesariamente se logra, como se aprecia en la **Figura 7-12** para el caso CNP100 de base aislada.

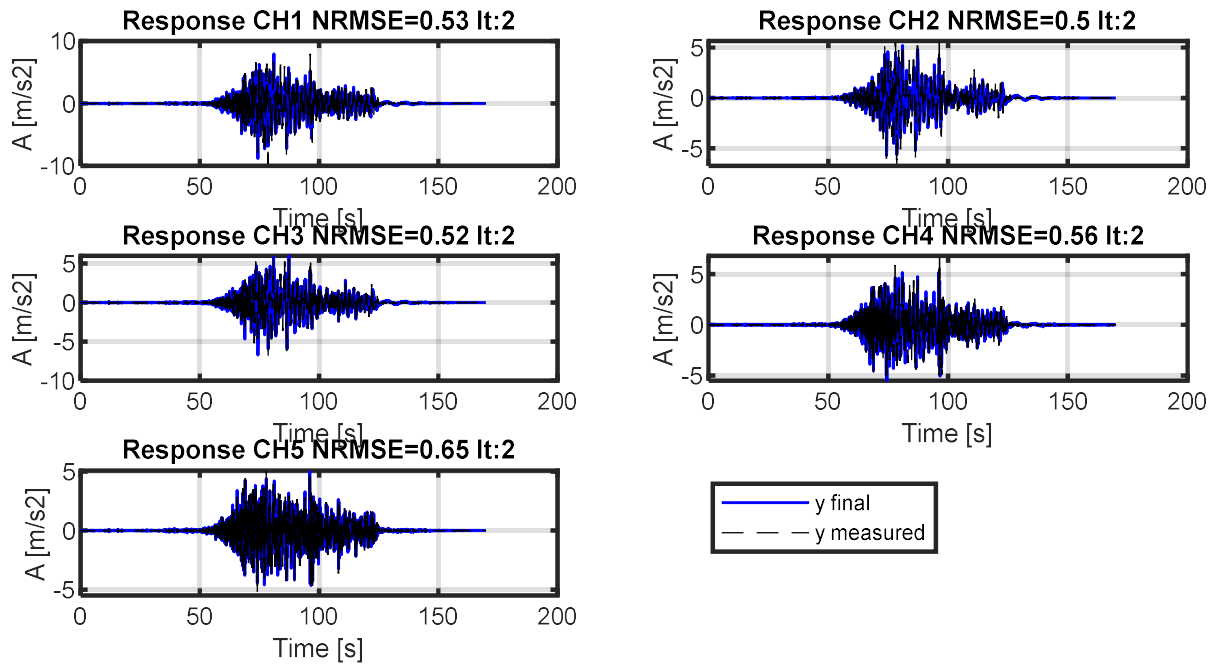


Figura 7-11: Respuesta Calcula UKF DEN67 FB

Las intensas variaciones de frecuencia y tasa de amortiguamiento para los casos de base aislada pueden generar ajustes erróneos al final del registro, dado los altos valores de la covarianza.

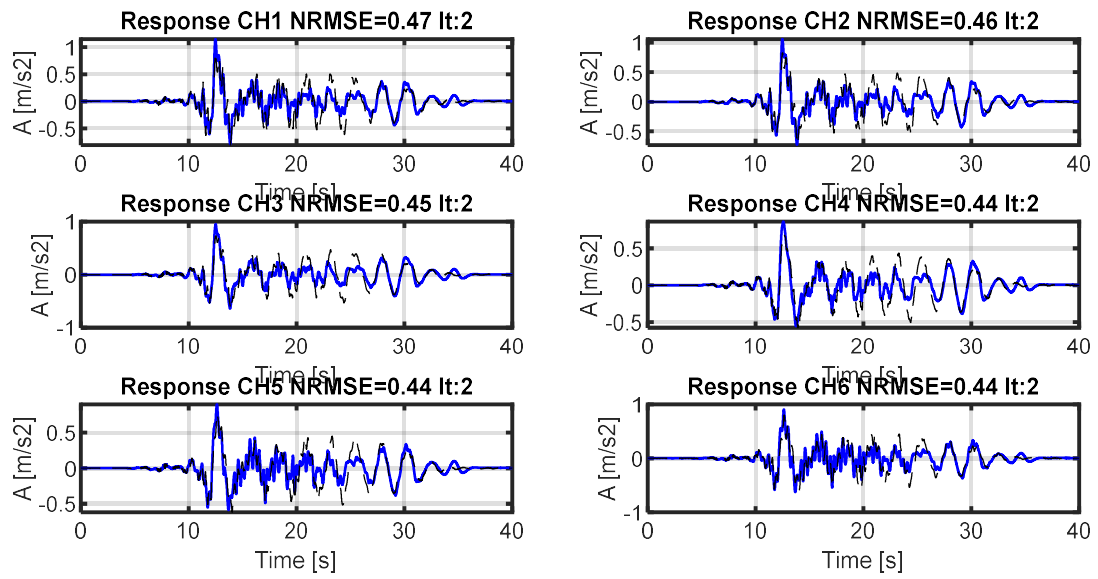


Figura 7-12: Respuesta Calcula UKF CNP100 BI

7.6 Variación en el tiempo de los parámetros normalizados

El algoritmo trabaja con los parámetros normalizados, es decir, se normalizan respecto a los valores iniciales (obtenidos mediante método DSI por pequeñas ventanas). Por cada modo, en cada uno de los registros se analiza la variación de: frecuencias, tasa de amortiguamiento, y todos los GDL de las formas modales.

Es importante recalcar que la variación posible en los parámetros depende de la covarianza y del valor del parámetro desnormalizado. Esto se refiere a que una variación idéntica entre dos parámetros normalizados representa una variación de distinto orden de magnitud, la cual depende respecto a que valor fue normalizado.

Para todos los casos se normaliza respecto a los parámetros iniciales de entrada, y de esta forma observar la variación respecto a estos valores iniciales.

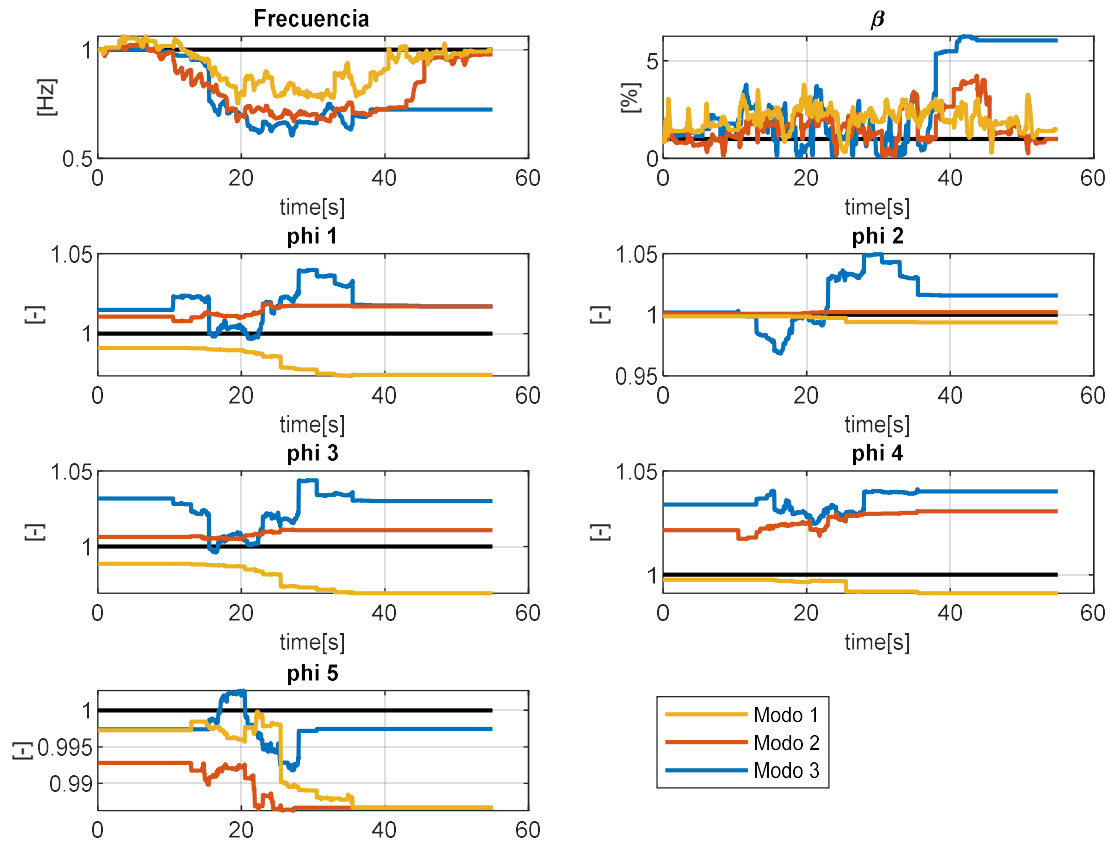


Figura 7-13: Variación parámetros normalizados UKF (CNP100 FB)

Se aprecia claramente que la variación más alta se observa en las frecuencias y tasas de amortiguamiento. Mientras que la variación de las formas modales parece estancarse

a un valor residual (mayor o menor), aunque no muy distinto a la inicial. En este caso podría deberse a un ajuste del factor de participación en cada uno de los modos.

Mientras tanto la desviación estándar de cada uno de los parámetros se puede apreciar en **Figura 7-14** y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

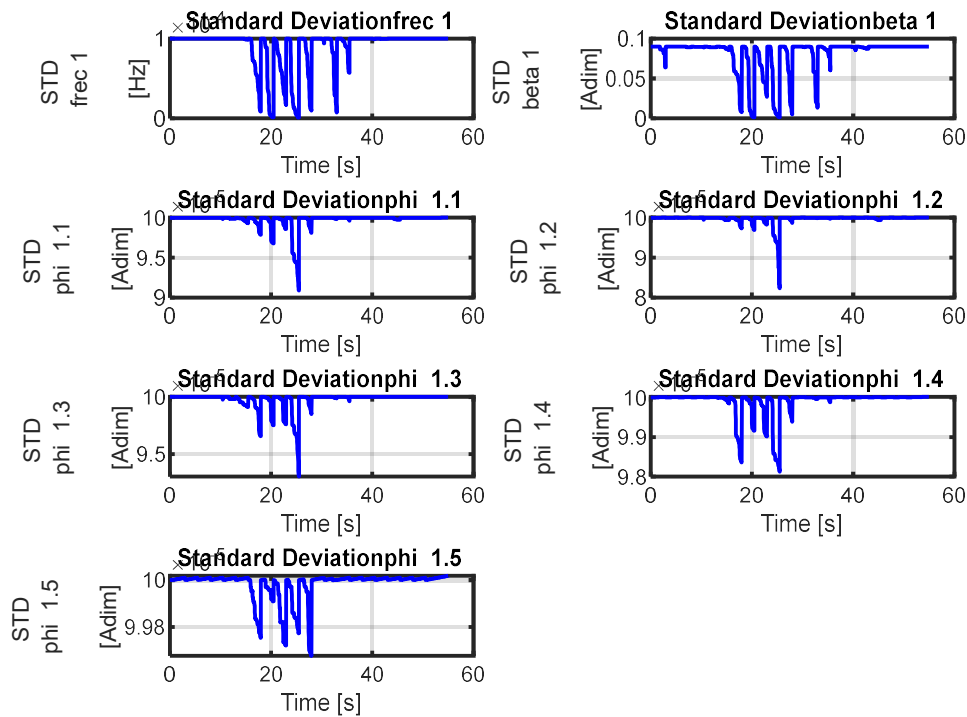


Figura 7-14: Desviación estándar parámetros normalizados UKF (CNP100 FB, modo 1)

El segundo caso analizado en este capítulo para base fija, DEN67 se incluirá en anexos. Y el análisis de la variación de sus parámetros normalizados no es muy diferente al del caso CNP100.

Mientras tanto la variación de los parámetros normalizados para el ensayo con base aislada se puede observar en la **Figura 7-15** y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Es de esperar mayores cambios en las tasas de amortiguamiento normalizadas.

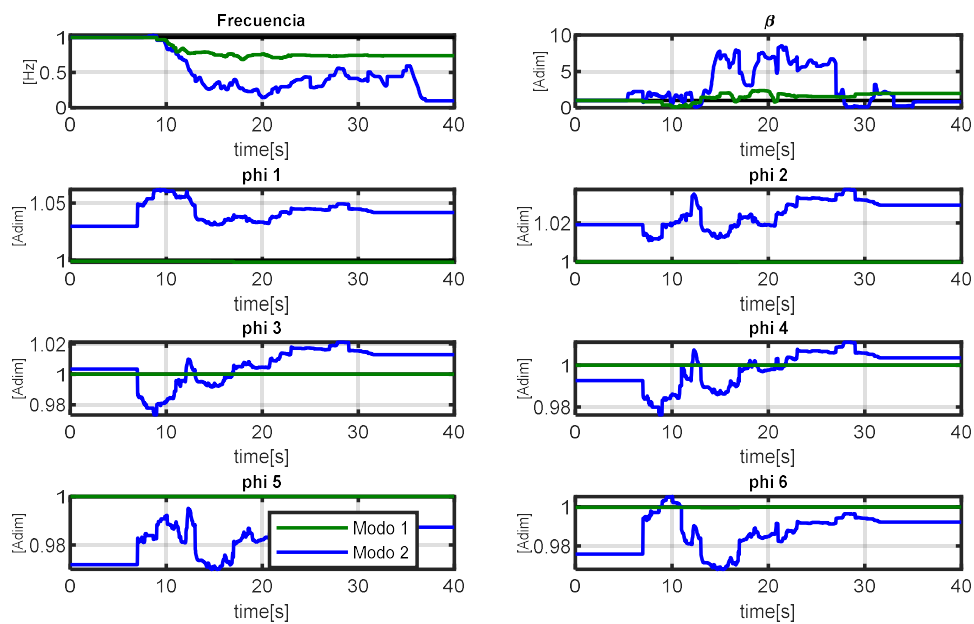


Figura 7-15: Variación parámetros normalizados UKF (CNP100 BI, modo 1)

Las variaciones de frecuencia y amortiguamiento de los parámetros normalizados son mucho mayores y más notorias para el caso CNP100 de base aislada. Sobre todo, respecto a la tasa de amortiguamiento con cambios grandes en periodos cortos de tiempo.

La variación estándar de los parámetros es notoriamente alta en el caso del amortiguamiento, donde existieron los mayores problemas de convergencia para los casos de base aislada.

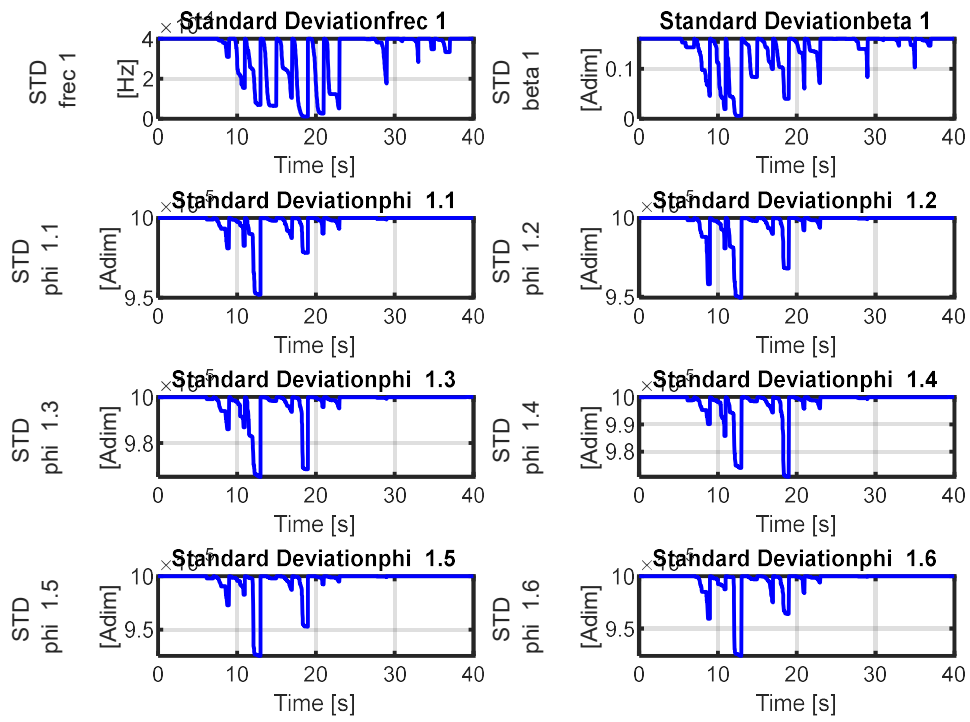


Figura 7-16: Desviación estándar parámetros normalizados UKF (CNP100 BI, modo 1)

7.7 Frecuencias

7.7.1 Frecuencias fundamentales

Para el inicio del algoritmo se pueden utilizar DSI por pequeñas ventanas para obtener las frecuencias y formas modales de los 3 primeros modos. Normalmente se trabajó con tres modos para los casos de base fija y dos modos para los casos de base aislada. Esto se debe a que en los casos de base aislada la participación del tercer modo es muy leve, lo que al final se traduce en inconsistencias en el cálculo con filtro de Kalman. En la Tabla 7-11 se indican las frecuencias obtenidas para los diferentes registros para los modos 1,2 y 3.

Tabla 7-11: Frecuencias identificada DSI pequeñas ventanas casos base fija

Registro	Modo 1 [Hz]	Modo 2 [Hz]	Modo 3 [Hz]
CNP100 FB	1.6	6.6	10.7
ICA50 FB	1.6	6.6	10.7
ICA100 FB	1.4	6	10
DEN67 FB	1.3	5.4	9.6
DEN100 FB	0.87	4.1	7.7

Se puede apreciar que en cada ensayo consecutivo se presenta una degradación estructural que se manifiesta en una disminución de los periodos en los primeros modos.

Análogo a lo anterior, se presenta en la **Tabla** 7-12 las frecuencias identificadas para los casos de base aislada

Tabla 7-12: Frecuencias identificadas casos base aislada

Registro	Modo 1 [Hz]	Modo 2 [Hz]	Modo 3 [Hz]
CNP100	1	3.5	6.9
ICA50	1.3	3.4	7.8
ICA100	1.4	3.2	6.9
ICA140	1	3.4	6.9
LAC100	1	3.2	6.9

7.7.2 Frecuencias identificadas con filtro de Kalman

La variación de la frecuencia en el tiempo esta estrictamente relacionada con el grado de no linealidad del comportamiento del edificio.

Se demarca el rango entre el 5% y el 95% de la IA, para tener en consideración el rango donde se ubica la mayor parte de la energía del sismo. En este rango es donde se esperaría la mayor variación de frecuencias y cambios más pronunciados de las tasas de amortiguamiento.

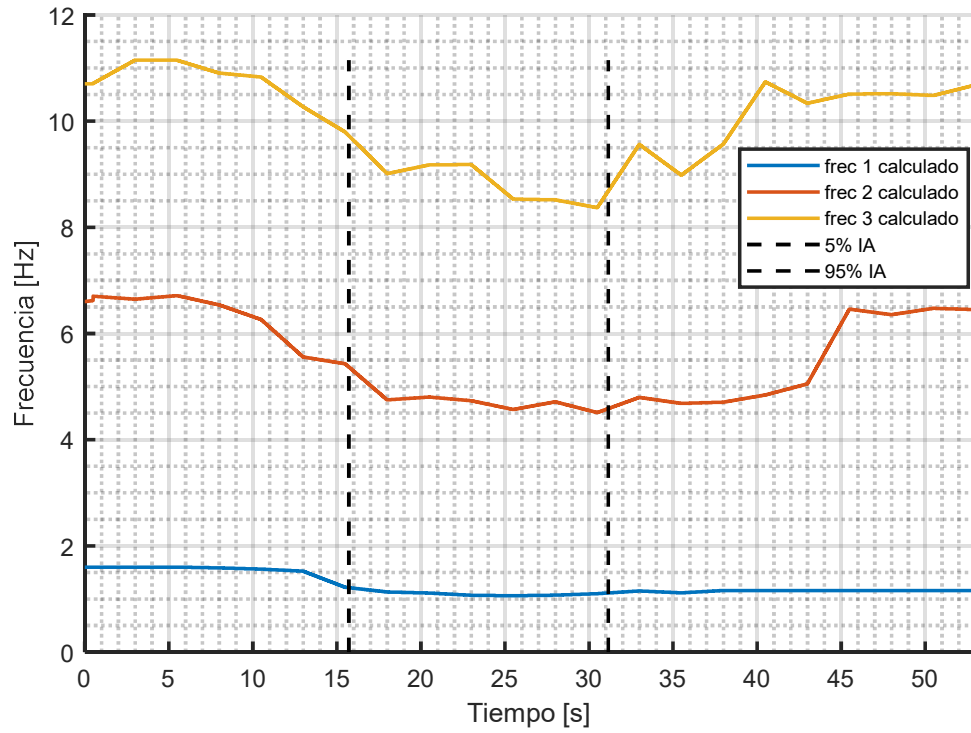


Figura 7-17: Frecuencias en el tiempo UKF (CNP100 FB)

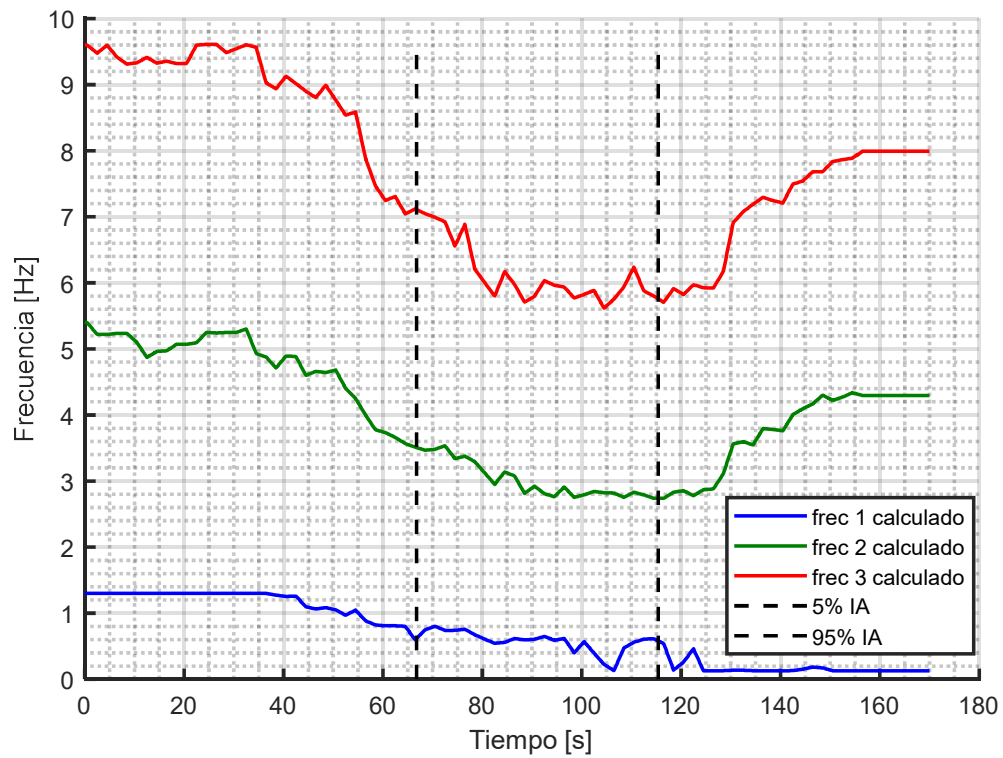


Figura 7-18: Frecuencias en el tiempo UKF (DEN67 FB)

Se pueden apreciar para la **Figura 7-18** las frecuencias al final del registro, sobre todo para el primer modo tienen una disminución mayor a la esperada. No se aprecia un retorno a un periodo de 1.2 Hz.

Mientras que para los casos de base aislada las frecuencias en el tiempo son como se muestran en la **Figura 7-19** y la **Figura 7-20**.

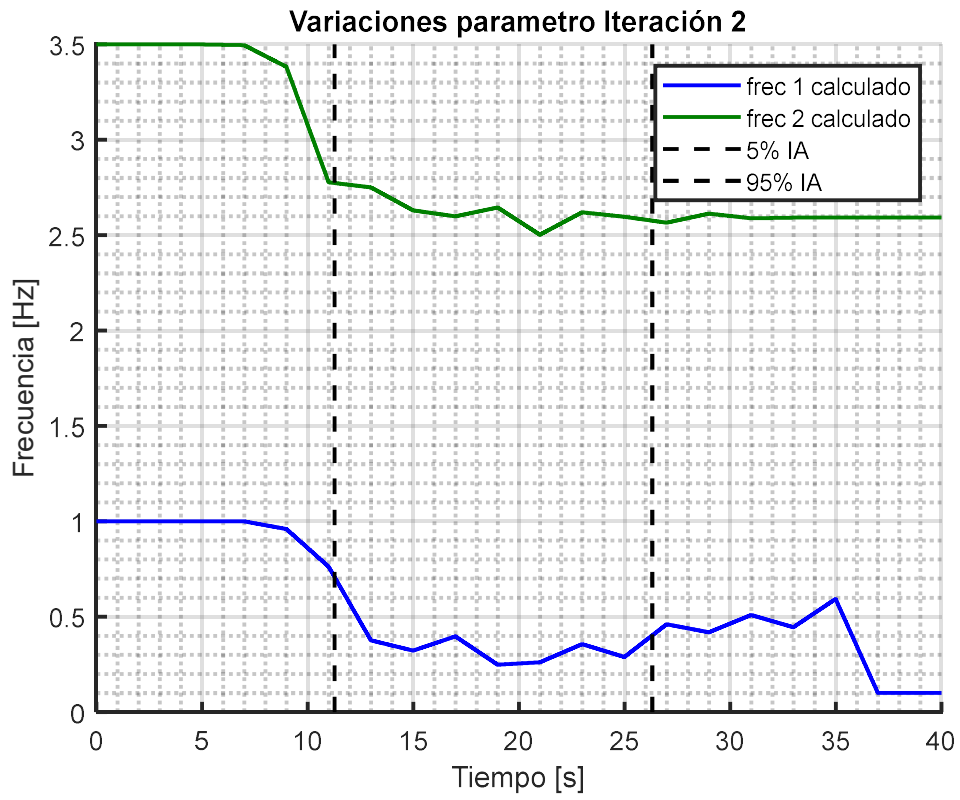


Figura 7-19: Frecuencias en el tiempo UKF (CNP100 BI)

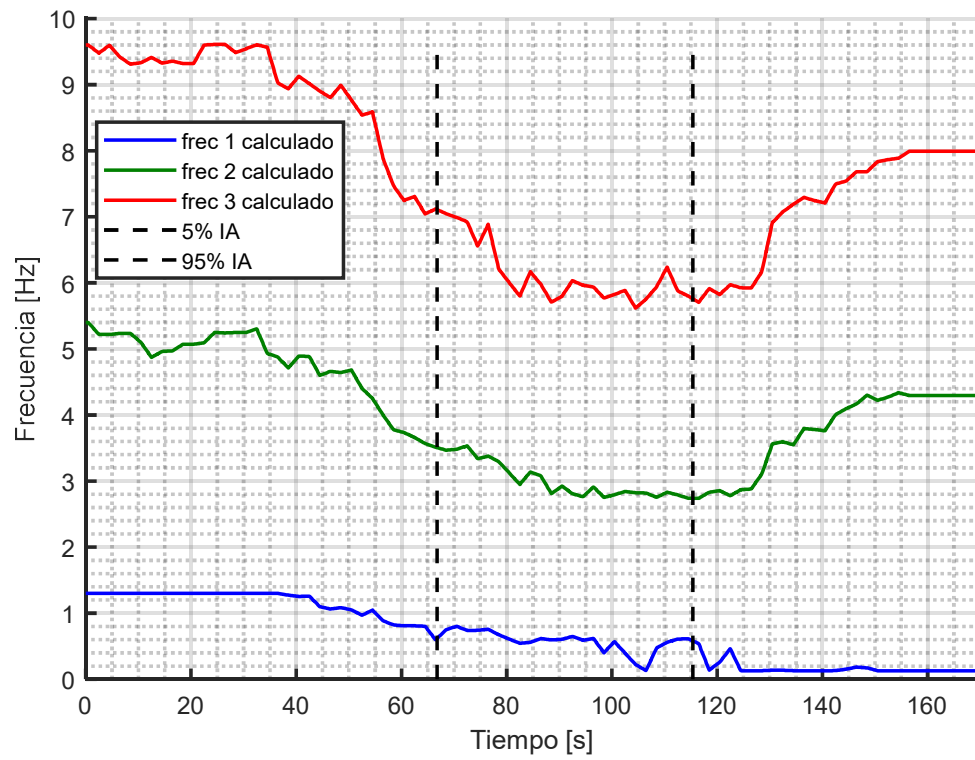


Figura 7-20: Frecuencias en el tiempo UKF (ICA50 BI)

7.7.3 Función de transferencia por pequeñas ventanas Caso base fija

Utilizar el espectrograma permite tener una idea si las frecuencias calculadas en el tiempo responden al algoritmo de optimización y se mantienen dentro de los valores esperados que son posibles de ver con el espectrograma. Naturalmente se espera observar un comportamiento donde la frecuencia baje para todos los modos en el movimiento más fuerte, donde se espera el mayor daño.

En los casos de base fija se estudiaron 3 modos para todos los casos. El estudiar un cuarto modo provocaba mayores imprecisiones en los resultados.

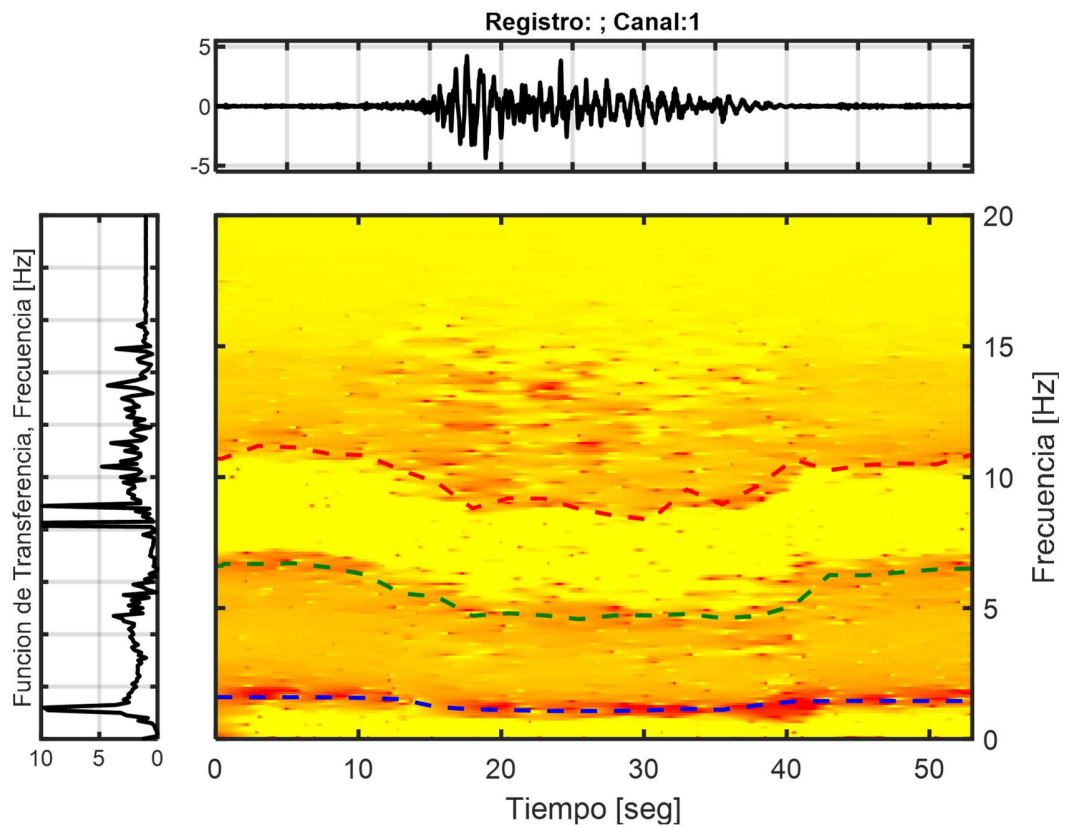


Figura 7-21: Transferectograma por pequeñas ventanas (CNP100 FB)

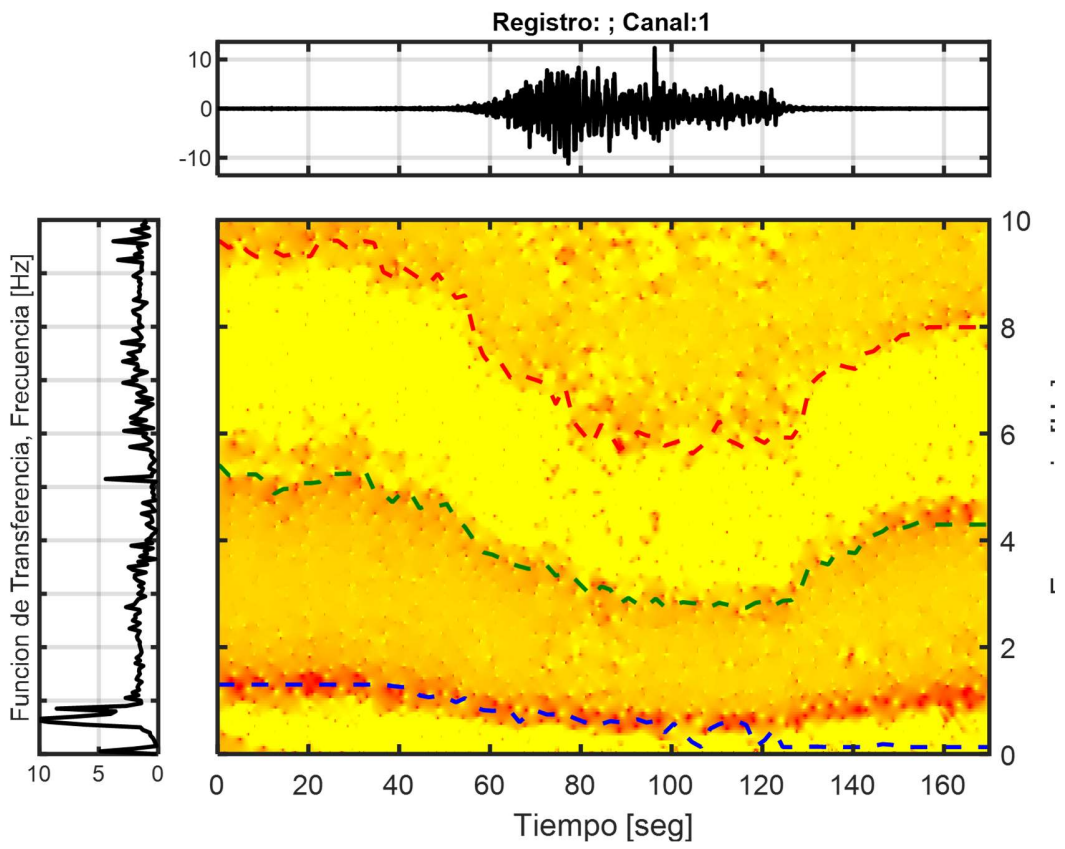


Figura 7-22: Transferectograma por pequeñas ventanas (DEN67 FB)

7.7.4 Transferectograma pequeñas ventanas Caso base Aislada

En los casos de Base aislada se observa menor precisión en el cálculo de las frecuencias, principalmente al final de los registros, donde la frecuencia calculada no coincide totalmente con los rangos de densidad de frecuencias observados en el espectrograma.

Un resultado para base aislada es el de la **Figura 7-23**.

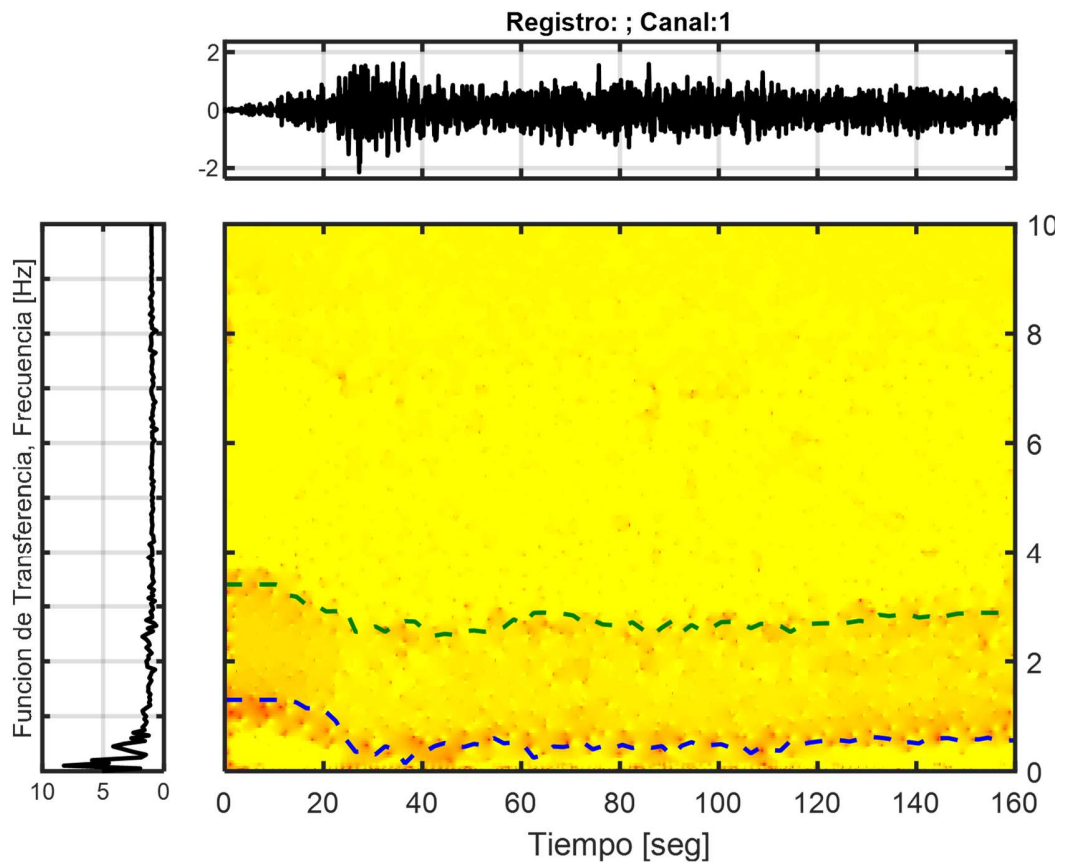


Figura 7-23: Transferectograma por pequeñas ventanas (ICA50 BI)

7.8 Aceleración modal

Cabe mencionar la importancia de la aceleración en cada uno de los modos. La sumatoria de cada una de estas aceleraciones multiplicada por su respectiva forma modal nos indica la respuesta final de la estructura.

Para el caso más analizado durante este trabajo de título, las aceleraciones modales se presentan en la **Figura 7-24**.

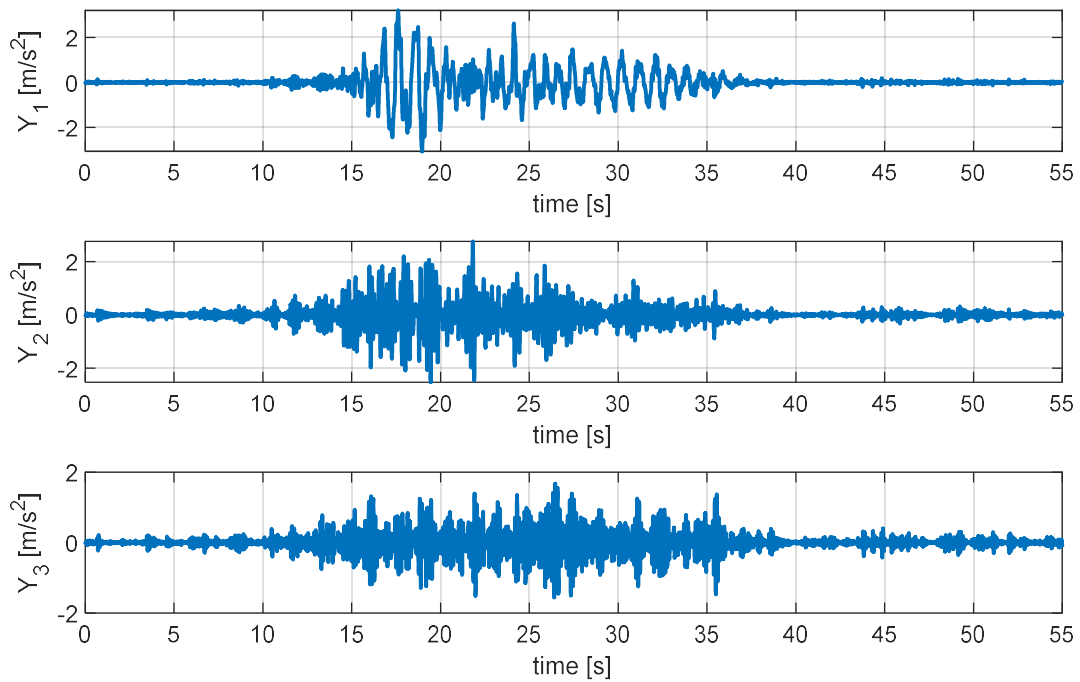


Figura 7-24: Aceleración cada modo (CNP100 FB)

Mientras tanto para el caso de base aislada CNP100 BI la Figura 7-25

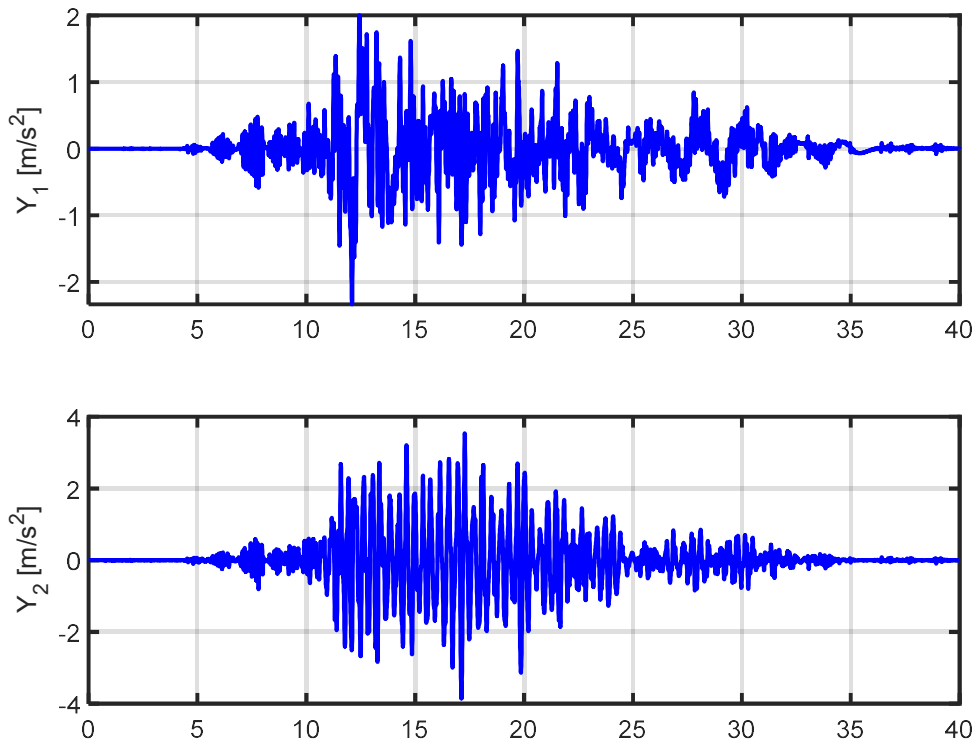


Figura 7-25: Aceleración cada modo (CNP100 BI)

7.9 Tasas de amortiguamiento utilizando UKF

En el caso de Base fija se observan las variaciones abruptas de la tasa de amortiguamiento en los tiempos de movimiento más fuerte. Es recurrente que el amortiguamiento residual no quede en valores esperados, sobre todo para el primer modo, donde a veces se producen inconsistencias entre amortiguamientos y frecuencias. Al mismo tiempo, se aprecia un comportamiento dentro de lo esperado para los amortiguamientos del segundo y tercer modo, donde hay un incremento de este durante el movimiento fuerte y luego decae relativamente al valor inicial o a algún valor levemente más alto a este.

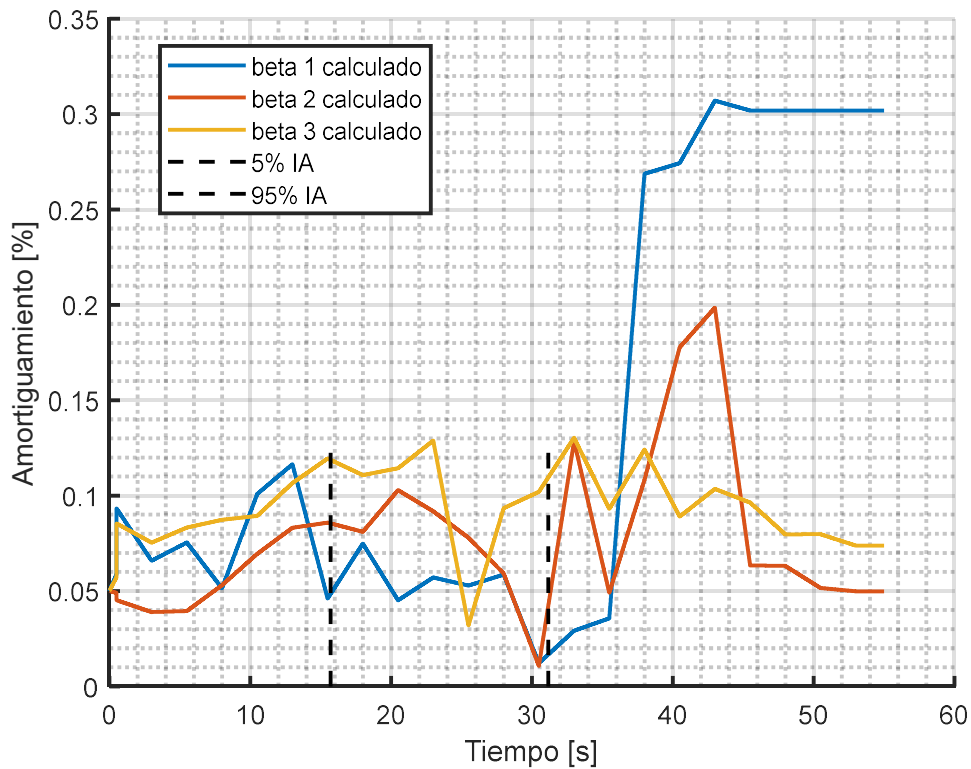


Figura 7-26: Amortiguamiento en el tiempo (CNP100 FB)

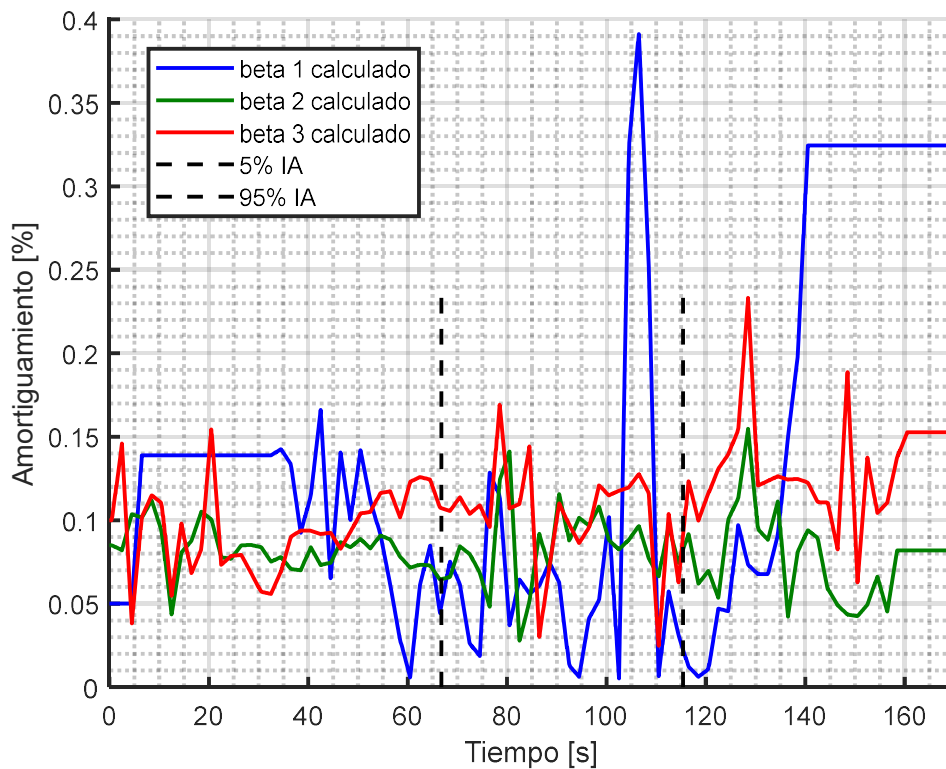


Figura 7-27: Amortiguamiento en el tiempo (DEN67 FB)

El primer modo tiene un comportamiento más extraño, en particular cuando el amortiguamiento baja a niveles de 1% o menores. Esto puede deberse a incompatibilidades entre frecuencias y tasas de amortiguamiento.

En el caso de base aislada se aprecian cambios abruptos y prácticamente instantáneos de la tasa de amortiguamiento. Es de esperar que la composición de los aisladores se genere una alta histéresis no lineal lo que se traduce en cambios sustanciales de amortiguamiento y frecuencia.

Este tipo de comportamiento requiere naturalmente de una alta covarianza para ciertos parámetros lo que genera distorsiones en el cálculo de frecuencias y tasas de amortiguamiento. Se puede apreciar que las tasas de amortiguamiento residuales, al estar finalizando el movimiento, no convergen a valores esperados de entre 3-8%. Este valor residual no esperado se puede en cualquiera de los modos. Sin embargo, parece ser más frecuente para la tasa de amortiguamiento del primer modo, donde se tiende a converger a un valor excesivo al esperado, además se aumentará una vez que el movimiento fuerte ya finalizó hace varios segundos.

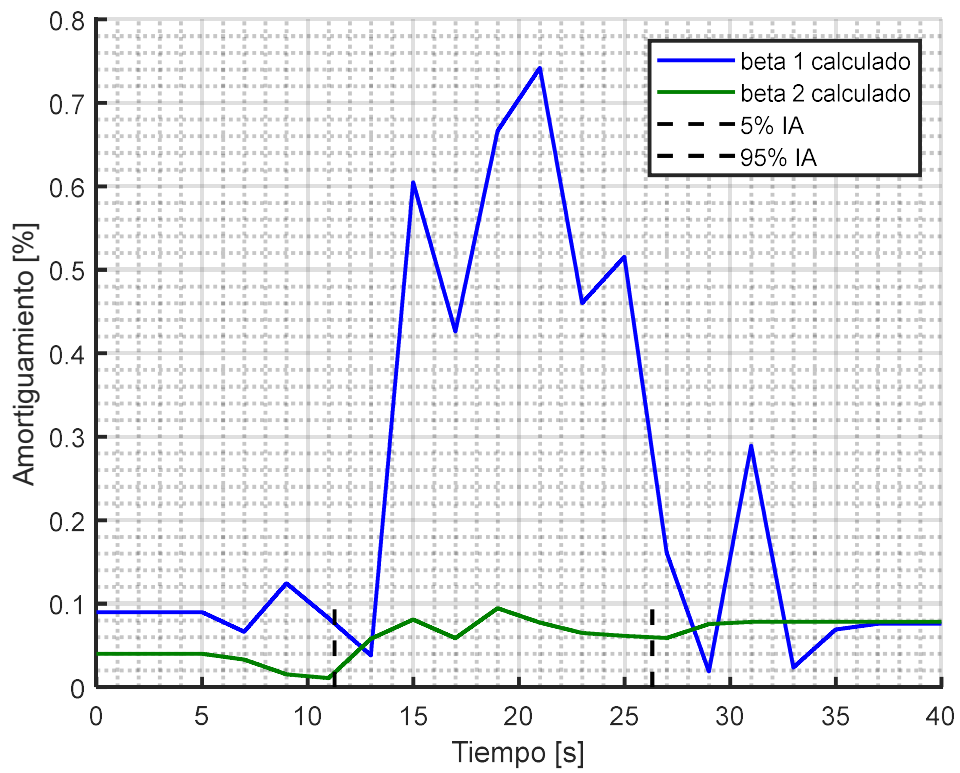


Figura 7-28: Amortiguamiento en el tiempo (CNP100 BI)

El amortiguamiento sube demasiado para este caso anterior, existen otros más consistentes como el de la **Figura 7-29**.

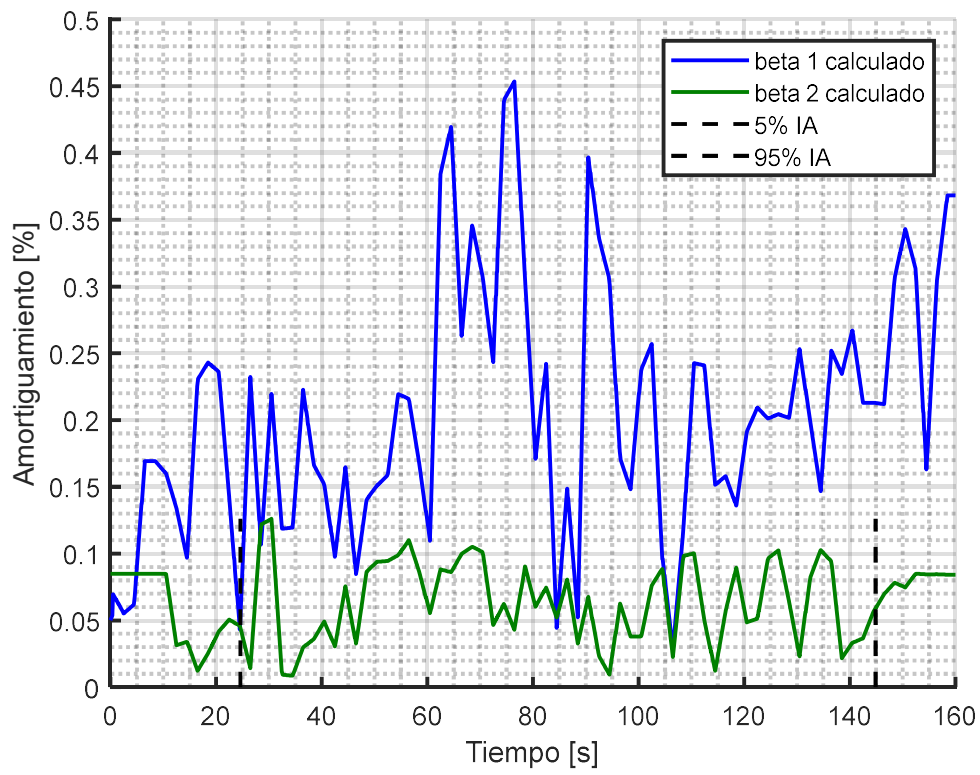


Figura 7-29: Amortiguamiento en el tiempo (ICA50 BI)

7.10 Formas modales

El método DSI por pequeñas ventanas permite obtener las formas modales. Las formas modales suelen mantenerse relativamente constante en el tiempo. Claro que se debe tener especial consideración que la variación de estas está sujeta a la covarianza con que se calcula el algoritmo. Normalmente no se requiere dar un gran grado de desviación a las formas modales debido a que suelen mantenerse relativamente constantes en el tiempo a pesar de que haya cambios considerables en la frecuencia. Por otro lado, el método DSI por pequeñas ventanas encuentra de manera bastante precisa estas formas modales. Se debe recordar que se agrega el factor de participación suponiendo una matriz de masa con distribución homogénea en cada uno de sus pisos.

En la **Figura 7-30** y **Figura 7-31** se puede apreciar las formas modales asociadas cuando el registro se encuentra en movimiento fuerte, o bien, dentro del rango de 5-95% IA.

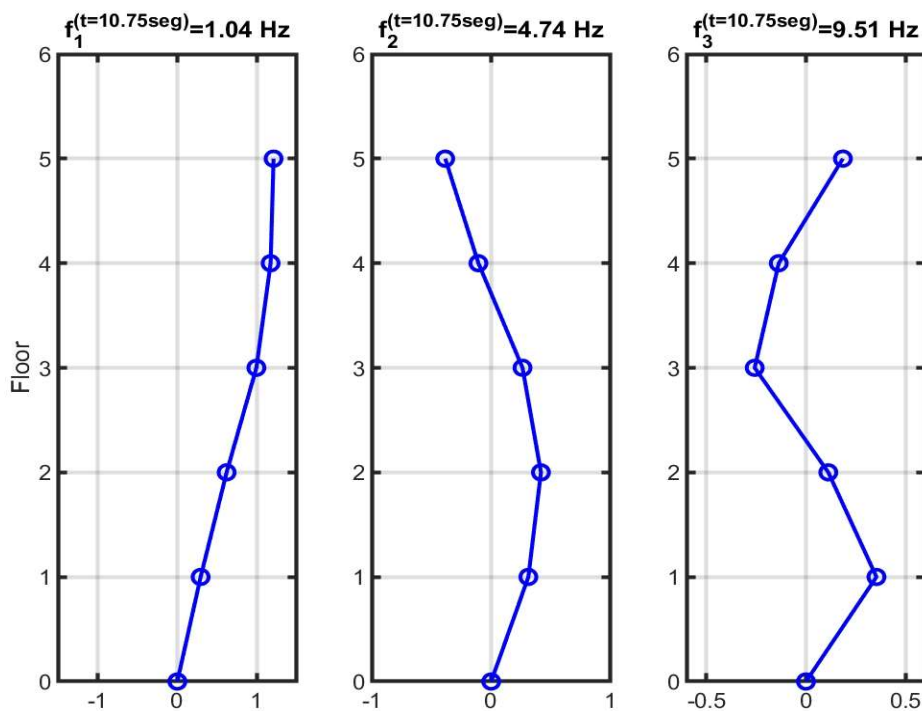


Figura 7-30: Formas modales CNP100 FB

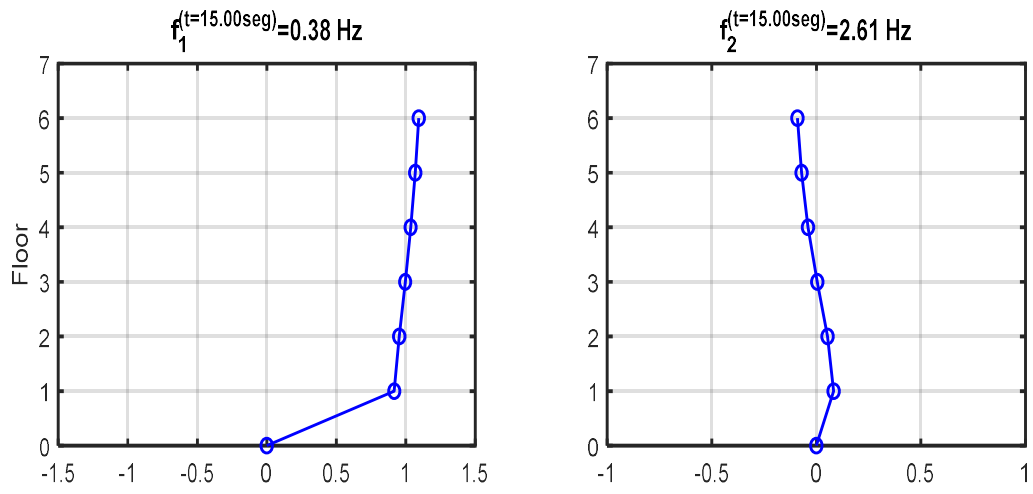


Figura 7-31: Formas modales CNP100 BI $t=15$ seg

7.10.1 Variación MAC acumulado

La variación de las formas modales en tiempo puede ser representada por el MAC. Para los casos de base fija en **Figura 7-32** y **Figura 7-33**.

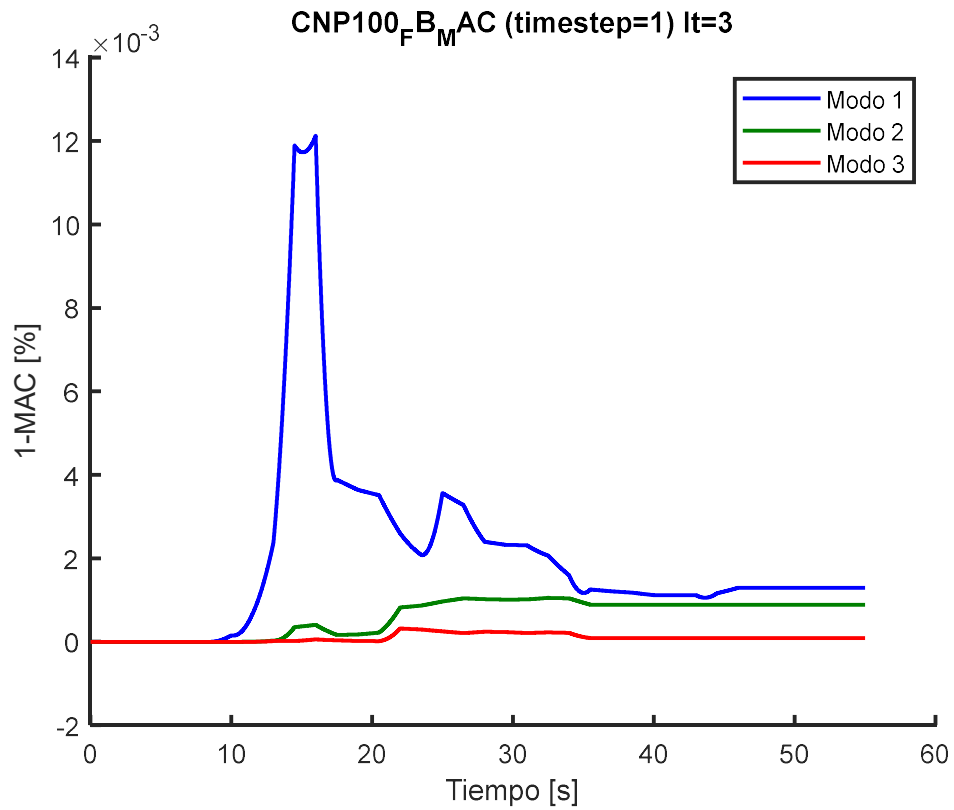


Figura 7-32: MAC en el tiempo CNP100 FB

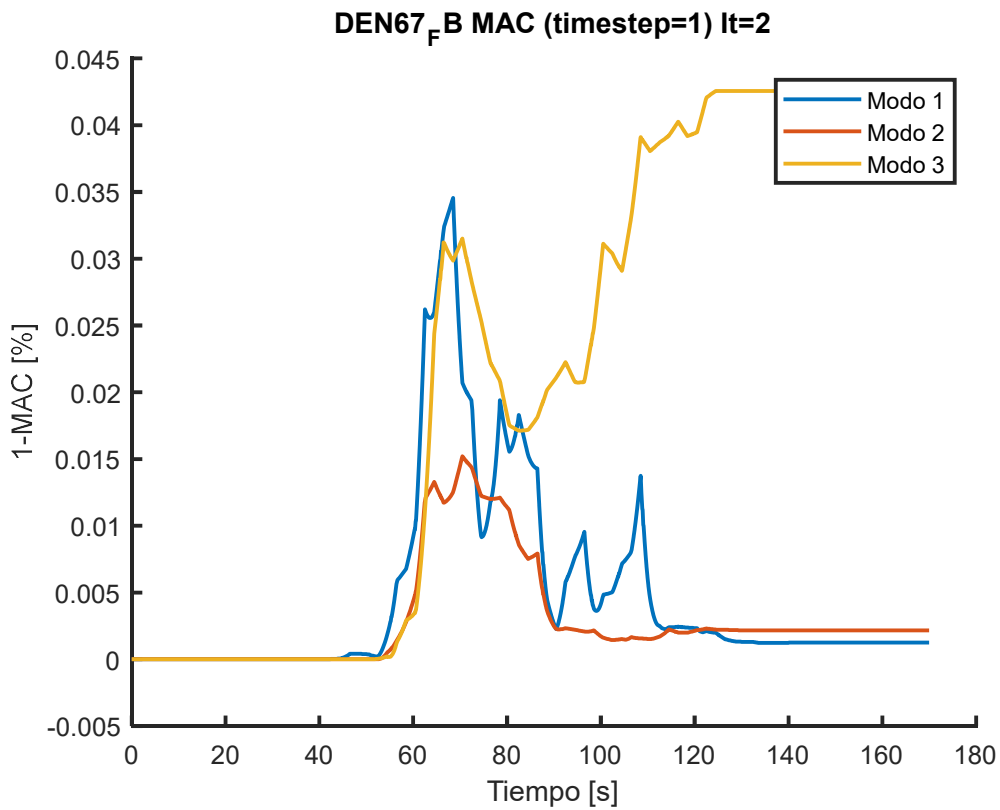


Figura 7-33: MAC en el tiempo DEN67 FB

Por otro lado, los casos de base aislada tienen un mayor grado de desviación en la covarianza de las formas modales, por lo que se debería esperar una mayor variación del MAC en el tiempo (**Figura 7-34** y **Figura 11-53**).

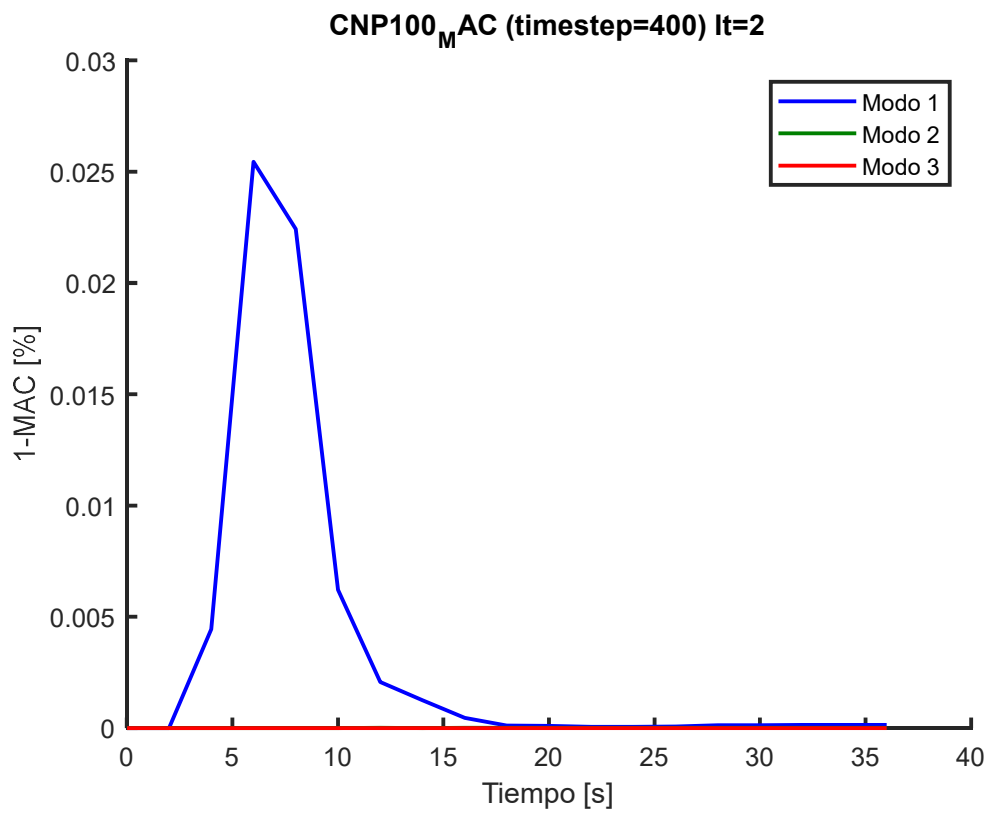


Figura 7-34: MAC en el tiempo CNP100 BI

8 Optimización mediante Newton Raphson

La utilización de una optimización Newton-Raphson permite tener un mayor control sobre el cálculo de la tasa de amortiguamiento. Para efectos de este trabajo de título, considerando que las frecuencias fueron correctamente calculadas (al menos al comparar con los espectrogramas), se utilizaron los mismos vectores de frecuencia en el tiempo calculadas con UKF. Esto posee la ventaja que se evitan las divergencias y errores que se pueden generar al optimizar frecuencias y tasas de amortiguamiento al mismo tiempo. Por ende, se concentra la optimización en las tasas de amortiguamiento y con ello se aplican ciertas características que permiten mayor control sobre el cálculo. Por ejemplo, delimitar máximos o mínimos.

De la misma manera, una ventaja fundamental frente a UKF es el hecho que se puede trabajar mejor por pequeñas ventanas. En contraste, los filtros de Kalman presentaron buenos resultados en rangos de ventanas de entre 1.5 y 2.5 segundos.

8.1 Ajuste amortiguamiento mediante N-R y método peak-picking

Cabe destacar que el vector de frecuencias en el tiempo puede ser obtenido de otras maneras, en lugar de utilizar el generado por la rutina de esta memoria. En un inicio se utilizó el transferectograma para dibujar manualmente el cambio de la frecuencia en el tiempo, sin embargo, el hecho de hacerlo manualmente implica interpretar el transferectograma lo que conlleva a cometer errores, los que pueden generar divergencias en las tasas de amortiguamiento. Esta técnica, conocida como peak picking, será un tema de discusión para esta memoria, dado que una correcta interpretación de la frecuencia en el tiempo presenta resultados muy prometedores con la tasa de amortiguamiento.

Para el caso CNP100 se generó un archivo con la frecuencia en el tiempo de manera manual como vemos en la Figura 8-1.

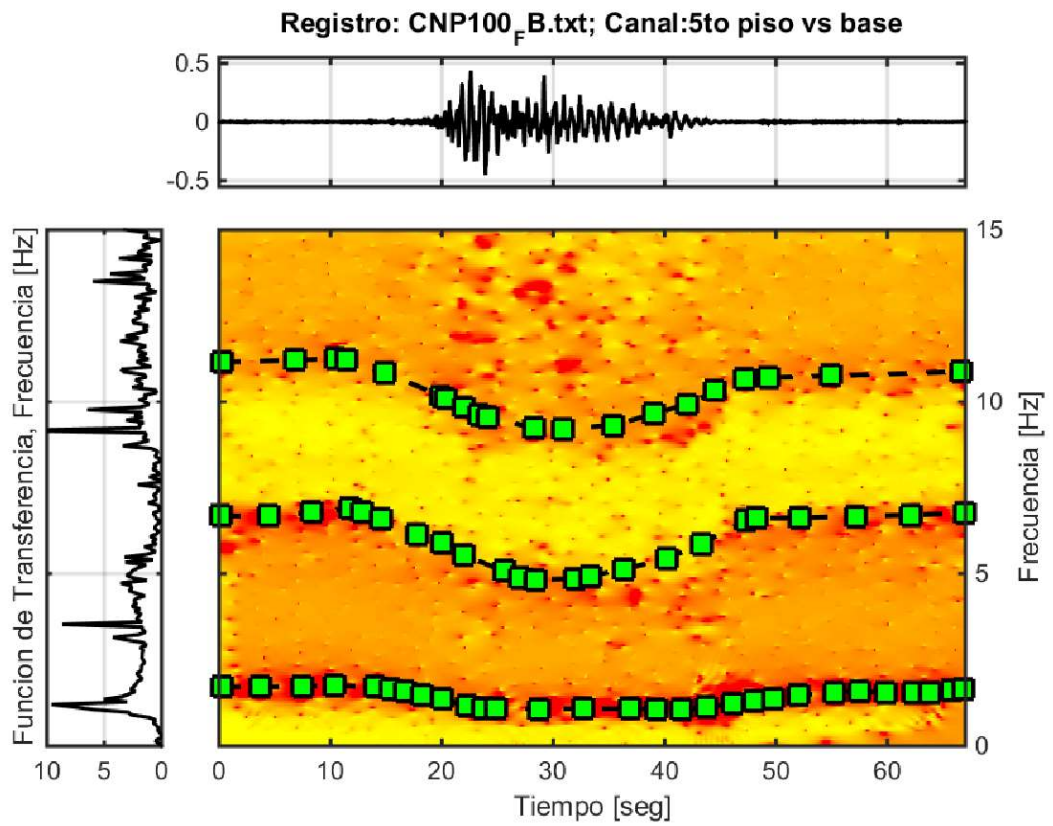


Figura 8-1: Frecuencia en el tiempo construida con peak picking para optimización N-R (CNP100 FB)

A continuación, se presentan los ajustes de amortiguamientos para el caso CNP100 FB (**Figura 8-2**) con el método peak-picking, donde hubo buenos ajustes de frecuencia para los 3 primeros modos. También se presentan las respuestas del modelo teniendo como entrada las frecuencias y formas modales calculadas con filtro de Kalman, junto con los amortiguamientos calculados de N-R

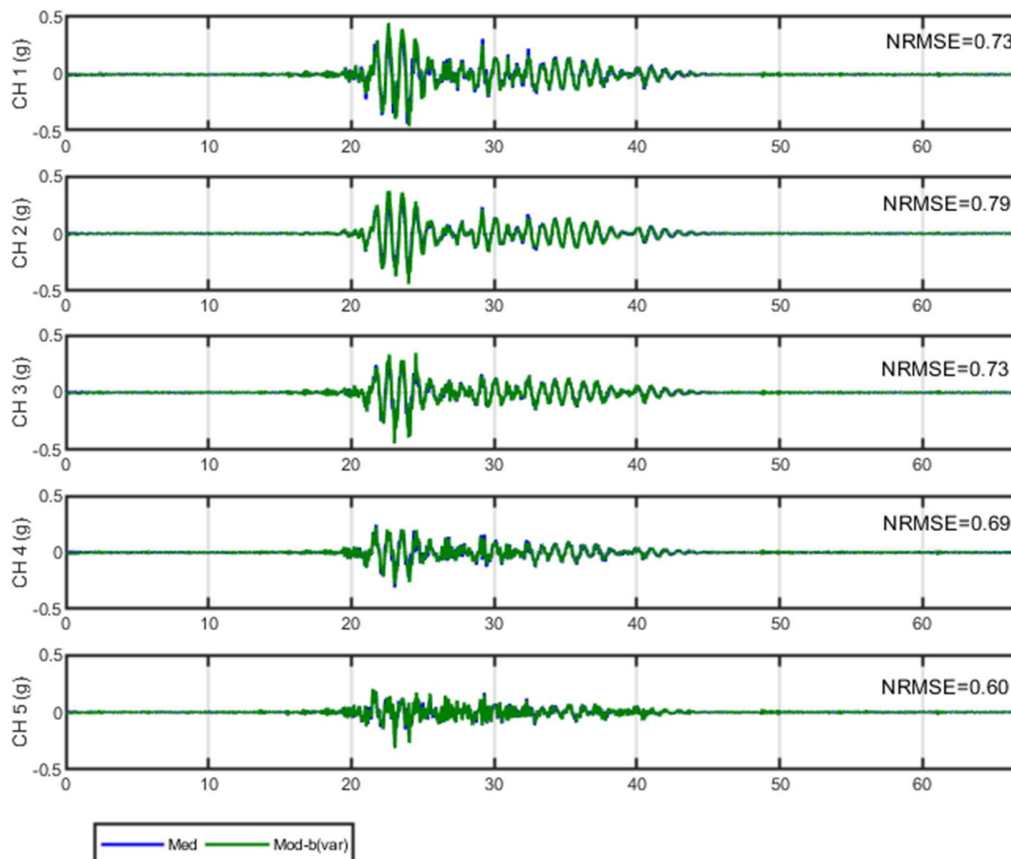


Figura 8-2: Respuesta calculada con N-R y método peak picking(CNP100 FB)

El grado de error para la respuesta calculada versus la respuesta medida es bastante bajo para el caso CNP100 BI. El hecho que los vectores de frecuencias en el tiempo hayan sido correctamente identificados de seguro facilita una correcta optimización de la tasa de amortiguamiento. En otros casos en anexos, se observa que el cálculo del amortiguamiento no es del todo esperado. Esta interpretación se discutirá en detalle en el capítulo de conclusiones generales.

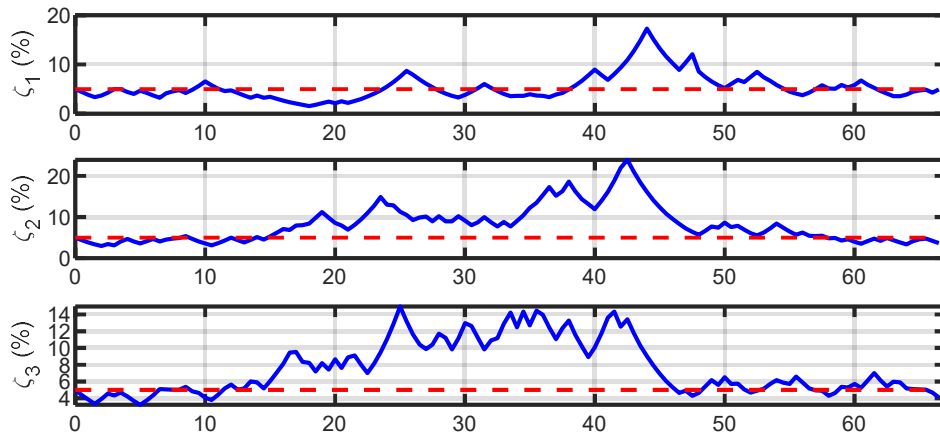


Figura 8-3: Amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R y método peak-picking (CNP100 FB)

El amortiguamiento del primer modo no es del todo esperado, dado que existe una baja de amortiguamiento al final, cuando en realidad se esperaba que volviera a un orden del 5%.

Las frecuencias pueden ser bien obtenidas por este método. Sin embargo, es un proceso sumamente manual. Otra opción es utilizar las frecuencias obtenidas con el filtro de Kalman, donde se aprecian vectores de frecuencia similares al obtenido con el método peak picking. En particular en las secciones donde se encuentra el intervalo 5-95% IA.

8.2 Ajuste de frecuencias y tasas de amortiguamiento mediante Newton-Raphson

Otra manera de abordar esta optimización que se utilizó en este trabajo de título consiste en optimizar tanto frecuencias como tasas de amortiguamiento. El error por minimizar de la optimización corresponde a la diferencia entre el valor del transferectograma entre el valor medido y el experimental. Esta optimización se realiza por partes, primero con frecuencias y luego con amortiguamiento para cada una de las ventanas de tiempo.

En la **Figura 8-4** se puede apreciar que el algoritmo entrega una buena aproximación de la respuesta experimental a la medida para el caso CNP100 FB. De hecho, la mejor aproximación de todos los casos estudiados en este trabajo de título.

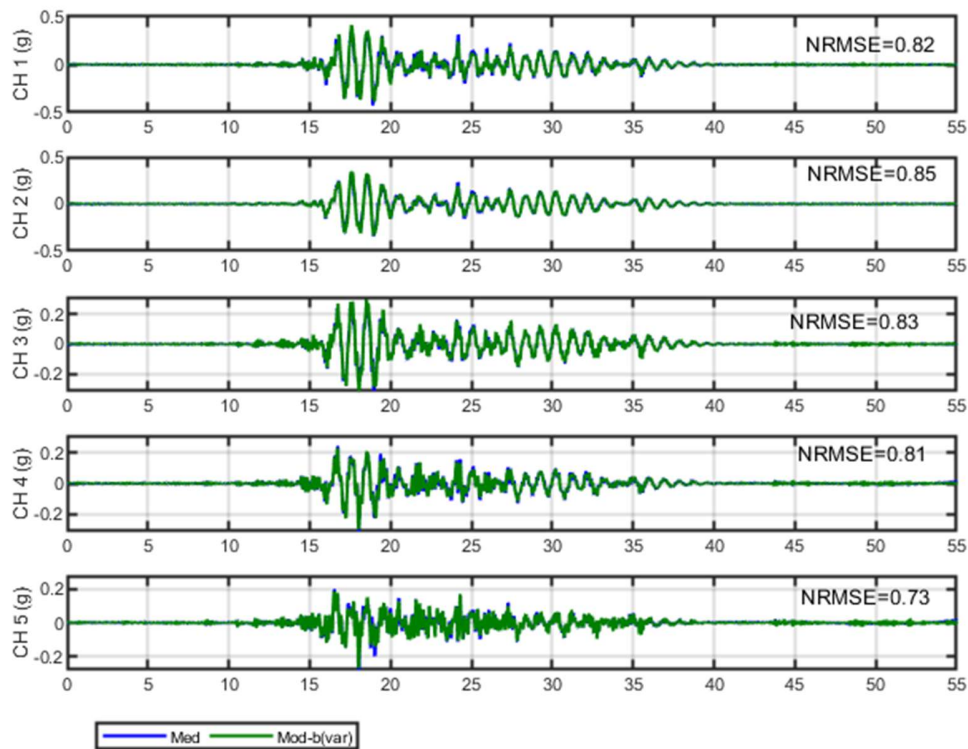


Figura 8-4: Respuesta frecuencia y amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (CNP100 FB)

Resulta pertinente utilizar el transferectograma para comparar el cambio de frecuencia en el tiempo.

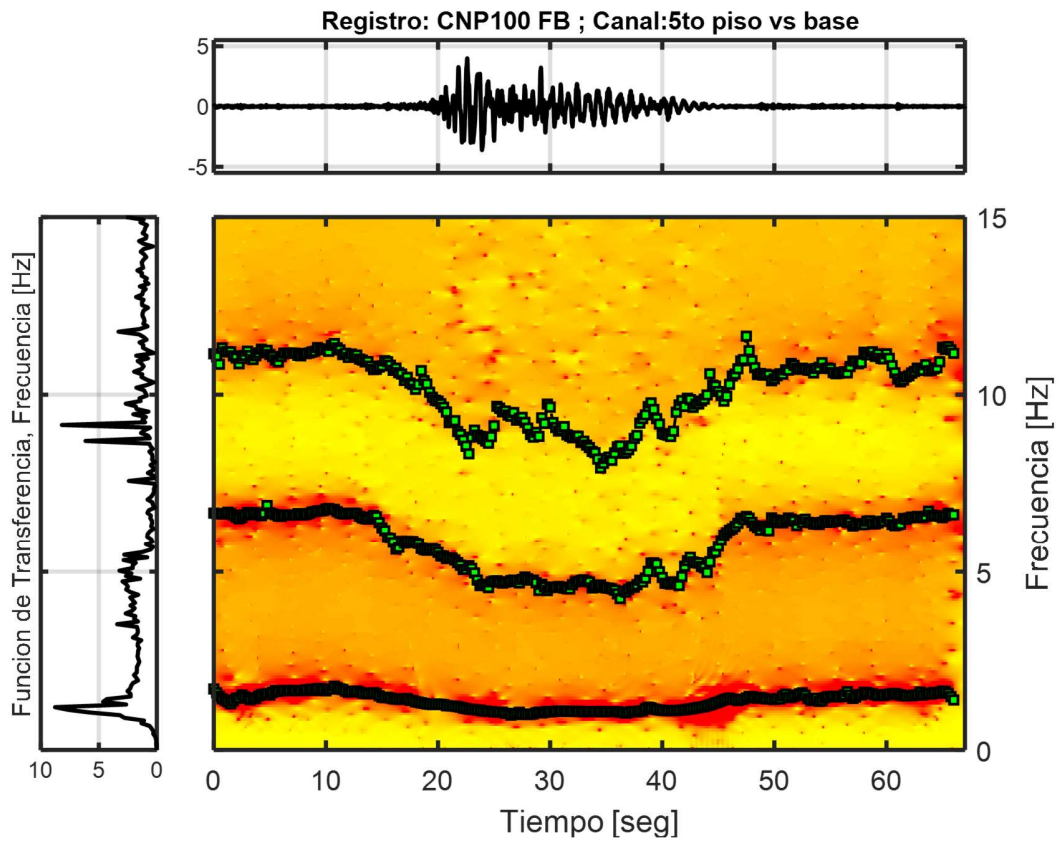


Figura 8-5: Transferectograma y frecuencias ajustadas en el tiempo (CNP100 FB)

El ajuste de las frecuencias es bastante preciso a primera vista, por lo que se debería esperar un buen ajuste de las tasas de amortiguamiento y de la respuesta modelada a la experimental (**Figura 8-6**).

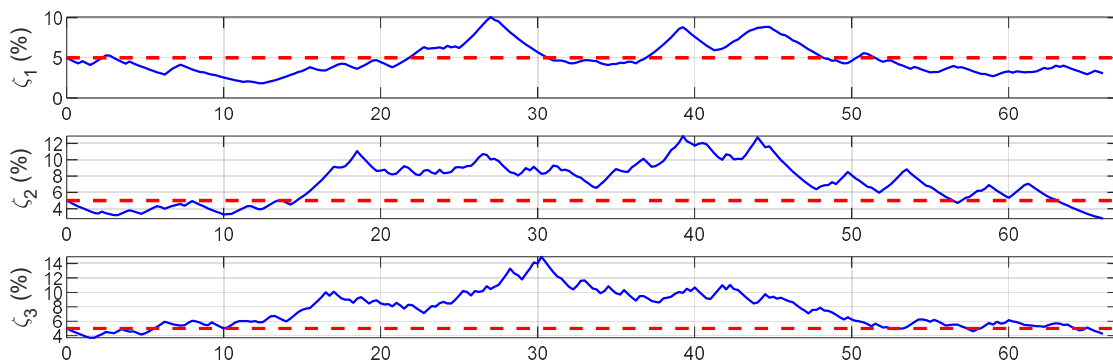


Figura 8-6: Ajuste tasas de amortiguamiento en el tiempo (CNP100 FB)

Este algoritmo con mínimos cuadrados logra tener un muy buen ajuste a primera vista, incluso en los casos de base aislada donde el método con UKF presentó ciertos problemas, el algoritmo con N-R logra calcular amortiguamientos más cercanos a un comportamiento esperado, como se observa en la **Figura 8-8** y para el registro ICA100

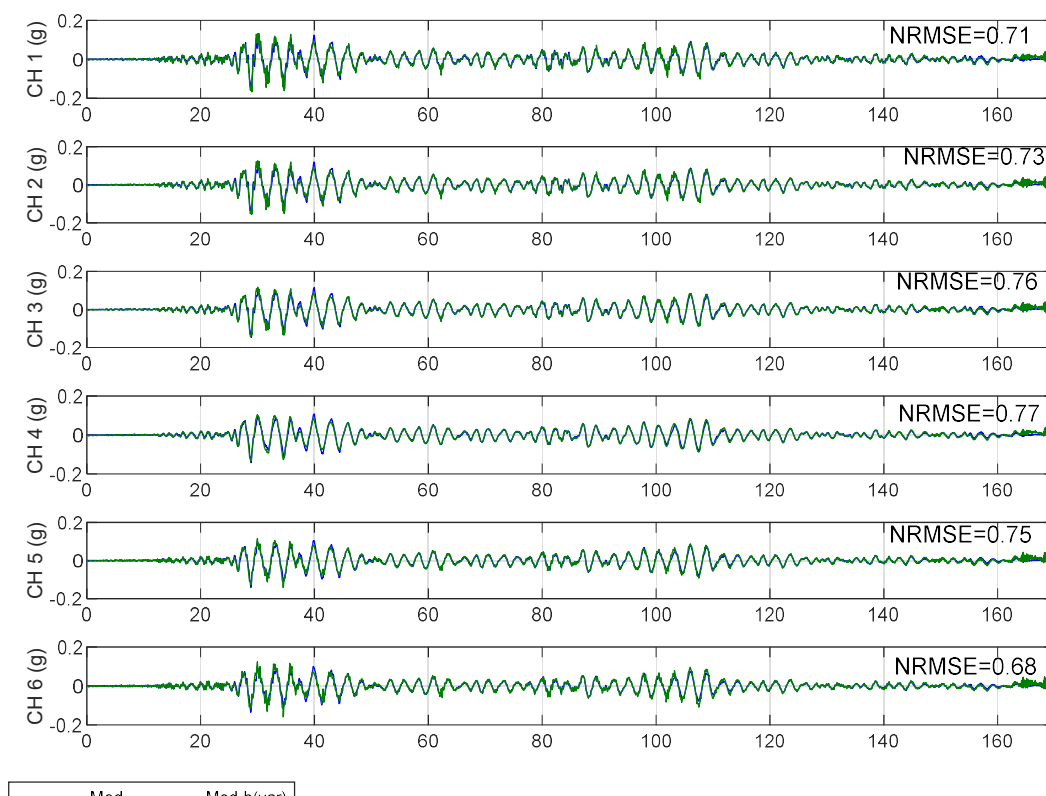


Figura 8-7: Respuesta frecuencia y amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (ICA100)

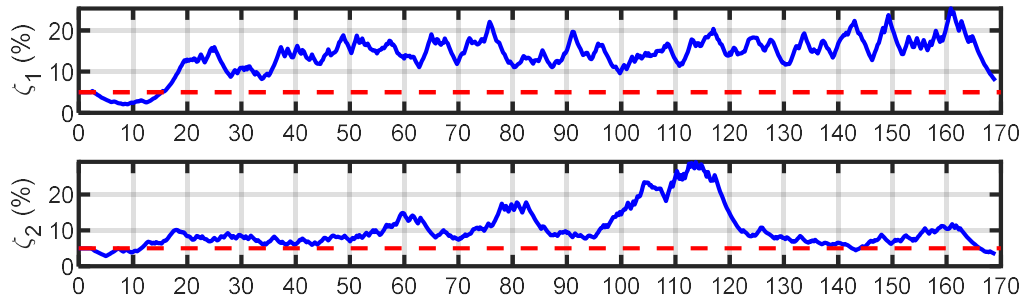


Figura 8-8: Ajuste tasas de amortiguamiento en el tiempo (ICA100)

Los amortiguamientos máximos son notoriamente más altos en los casos de base aislada a los casos de base fija.

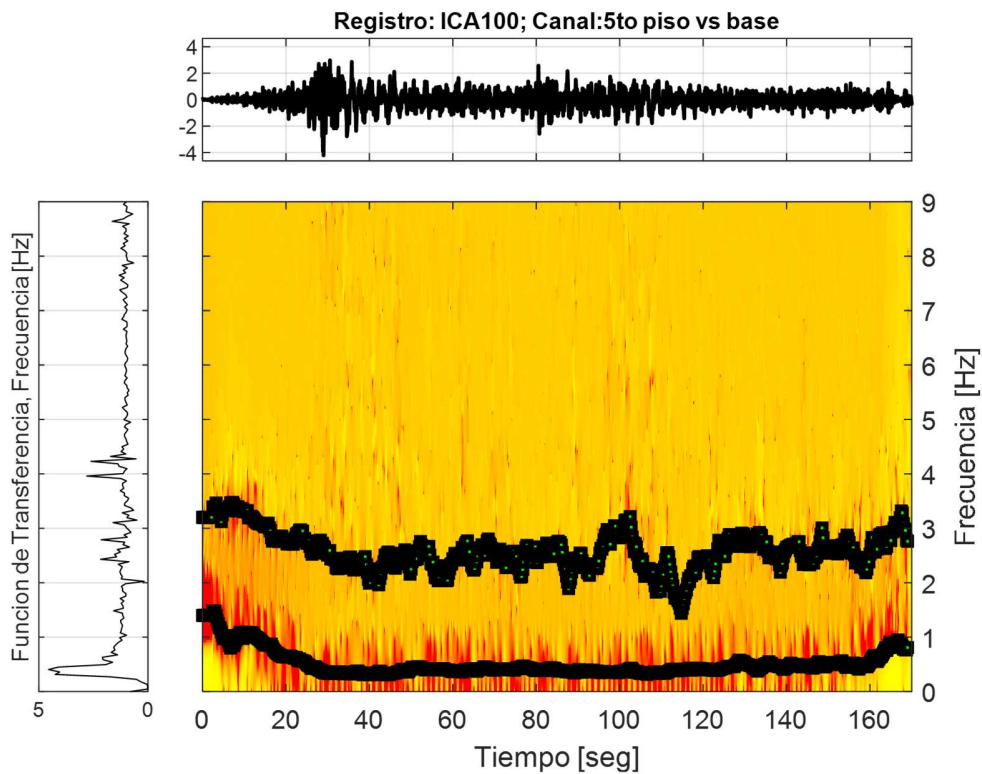


Figura 8-9: Transferectograma y frecuencias ajustadas en el tiempo (ICA100 BI)

9 Conclusiones generales

9.1 Frecuencias

Normalmente el método con filtros de Kalman por ventanas de 1.5-2 segundos resultó el más prometedor con los casos de Base fija y Base aislada. Esto sugiere que una variación lineal entre los parámetros calculados entre una y otra ventana representa de manera semejante el comportamiento calculado al observado.

El mecanismo de daño en el caso de base fija presenta mayor comportamiento no lineal dada la ausencia de los aisladores sísmicos, lo que se traduce en mayor confiabilidad con los filtros de Kalman. El hecho que la variación de la frecuencia y amortiguamiento sea menos instantánea en los casos de base fija permite al algoritmo trabajar sin matrices de covarianza con mucha desviación, lo que se traduce en una mejor convergencia en la optimización de cada ventana.

En el caso de los ensayos con base aislada, las frecuencias no se ajustan correctamente, sobre todo al final del movimiento. Esto se deba probablemente al mecanismo de daño y al hecho que se tenga que utilizar una covarianza con mucha desviación.

Es importante recalcar que el método de identificar frecuencias por peak picking con el transferectograma por pequeñas ventanas (STTF) presenta prometedores resultados y un gran grado de precisión. Sin embargo, no resulta tan rápido en la práctica. Además, interpretar el transferectograma implica calibrar cuidadosamente el contraste de saturación de colores para realizar un correcto peak picking. Es un método que requiere de práctica y de una interfaz cómoda para realizarse correctamente.

En ese sentido, los métodos de optimización por Newton Raphson presentan prometedores resultados para efectos del cálculo de frecuencia. Minimizando el error de la Transformada de Fourier por ventana del registro medido y del calculado se obtienen correctos vectores de frecuencia en el tiempo, con una clara concordancia con el transferectograma.

9.2 Amortiguamiento

Como primera conclusión respecto a las tasas de amortiguamiento cabe destacar que el cálculo con filtros de Kalman en los casos de base aislada presenta inconsistencias debido a la alta covarianza por ventana necesaria para operar. El hecho que los aisladores sísmicos sean justamente elastómeros sometidos a constante fluencia genera un mecanismo de comportamiento no lineal que es difícil de identificar, lo cual se manifiesta en una errónea adaptación entre la respuesta modelada a la medida.

Caso contrario con los casos de base fija, se observa un comportamiento más esperado de la tasa de amortiguamiento. Sin embargo, aparecen bajos amortiguamientos, generalmente durante el movimiento más fuerte. Estos pueden deberse a inconsistencias que podría arrojar el modelo al tratar de compensar cambios de frecuencia con cambios en amortiguamiento o viceversa.

Por otra parte, los amortiguamientos calculados con N-R, presentan resultados mucho más consistentes. Se logra apreciar una curva mucho más suave en las tasas de amortiguamiento. Además, se observa incluso un mecanismo de daño donde el amortiguamiento aumenta considerablemente durante el intervalo 5-95% IA, que es a priori lo que se esperaría.

9.3 Formas modales

Es importante recalcar que el factor de participación modal se encuentra incluido en las formas modales de entrada en el algoritmo. Esto implica que al ajustar la respuesta no solo se ajusta y modifica el MAC de la forma modal si no también su grado de participación. Esta variación obviamente está sujeta al grado de desviación que se especifique en la covarianza. Para todos los casos se dio el mismo grado de desviación en todos los GDL.

Ya sea para los cálculos con filtros de Kalman o con algoritmos de optimización N-R, las formas modales presentan una notoria constancia en el MAC, la cual se mantiene a pesar de que exista daño en la estructura durante el ensayo o bien exista un mecanismo de aislación en la base (el cual no tendría por qué mantener el MAC invariante en el tiempo).

9.4 Aceleraciones modales

Las aceleraciones modales puede ser una información útil de utilizar. De esta forma se podría construir un espectro real de la estructura. Donde sería de esperar que los amortiguamientos los modos superiores sea cada vez más alto. En este sentido el grafico de la Figura 9-1 se observa gran correlación entre el espectro y las aceleraciones modales totales. Existe en ciertos casos amortiguamientos más altos para los modos superiores. También en la Tabla 9-1 se pueden observar estos datos de la figura de manera más específica.

A partir del análisis modal se podrían determinar parámetros importantes del comportamiento dinámico como desplazamiento entre pisos, corte basal, demanda sísmica por niveles, etc.

Los resultados más generales de los parámetros en el tiempo para todos los registros se pueden observar en Figura 9-2 y Figura 9-3 para los casos de base fija y en la Figura 9-4 la Figura 9-5 para los casos de base aislada.

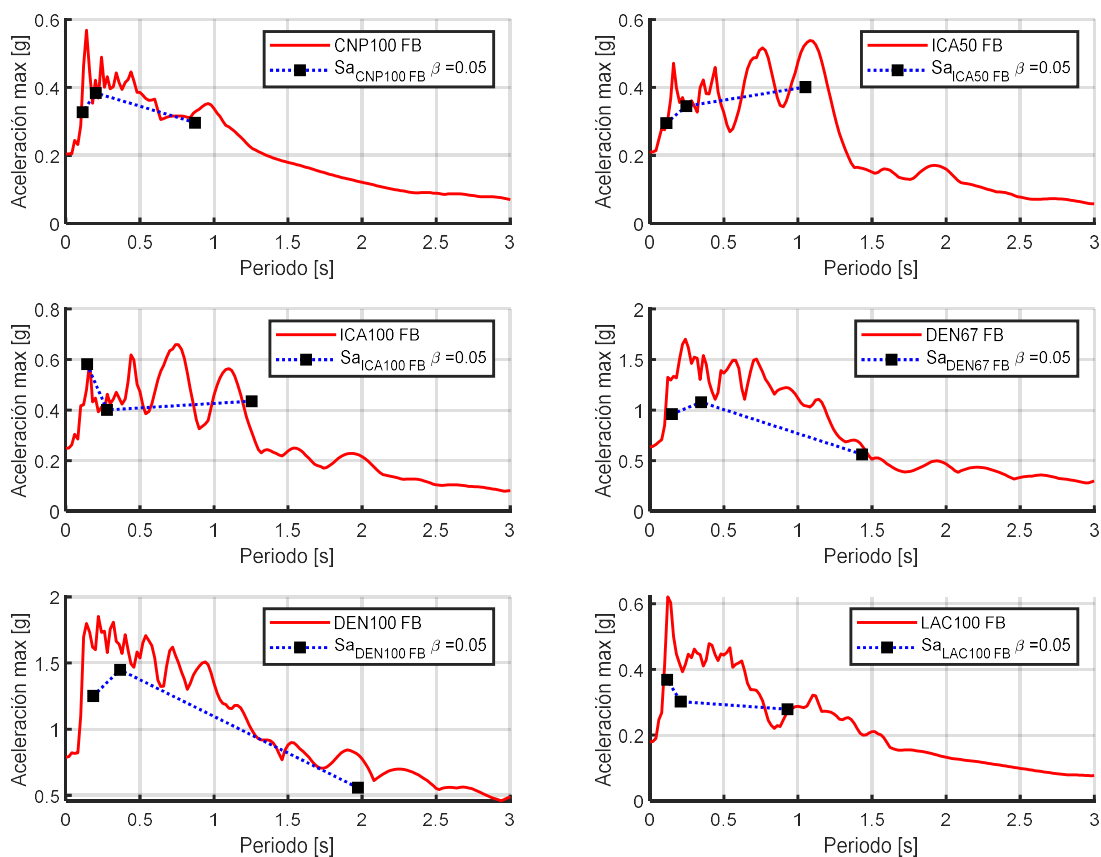


Figura 9-1: Espectro de aceleración casos base Fija.

Tabla 9-1: Tabla resultados finales frecuencias y amortiguamiento base fija

	Modo 1		Modo 2		Modo 3	
	T [s]	β [%]	T [s]	β [%]	T [s]	β [%]
CNP100 FB	0.87	0.05	0.20	0.09	0.11	0.07
LAC100 FB	0.93	0.05	0.21	0.08	0.12	0.08
ICA50 FB	1.05	0.06	0.25	0.09	0.11	0.09
ICA100 FB	1.25	0.06	0.28	0.06	0.14	0.10
DEN67 FB	1.43	0.06	0.35	0.10	0.15	0.08
DEN100 FB	1.97	0.10	0.37	0.07	0.19	0.10

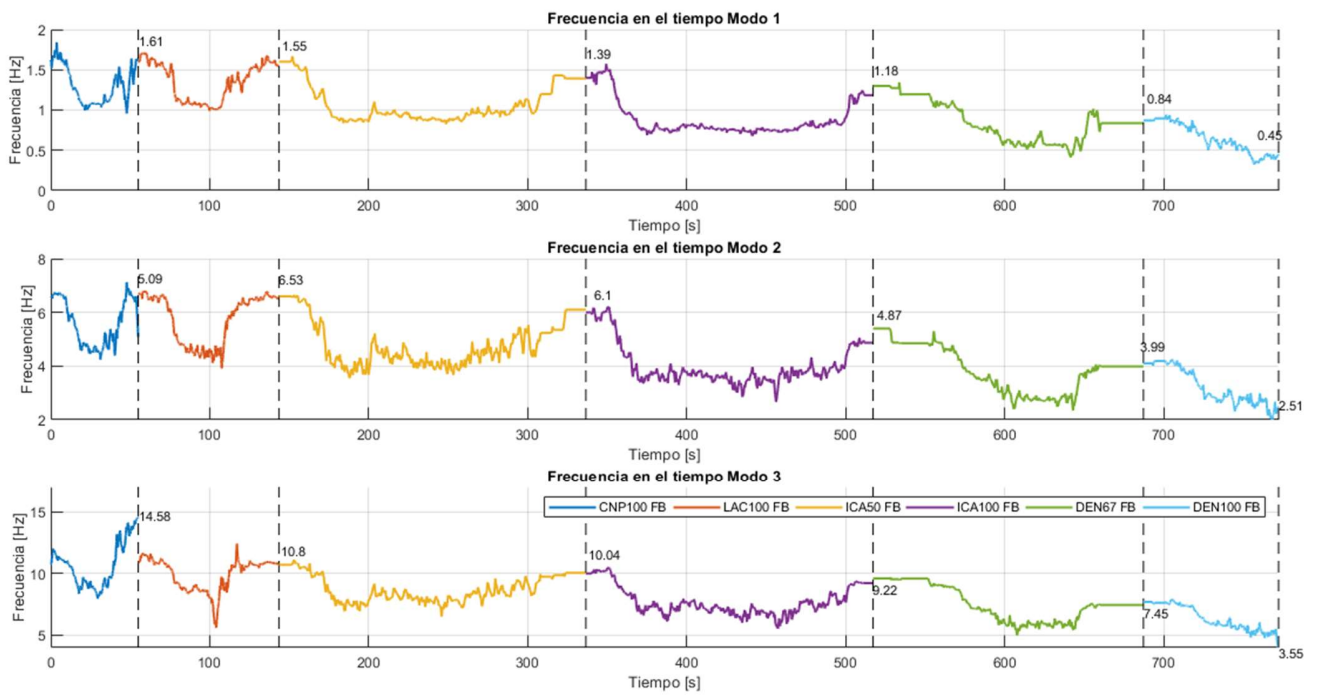


Figura 9-2: Frecuencia en el tiempo todos los registros FB.

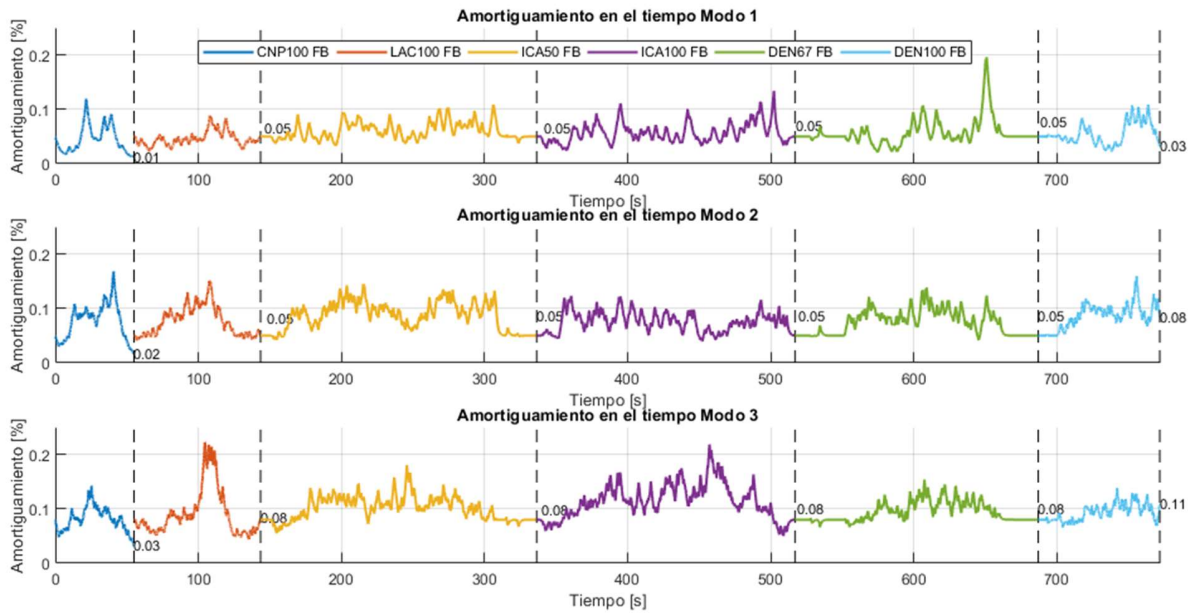


Figura 9-3: Amortiguamiento en el tiempo todos los registros FB.

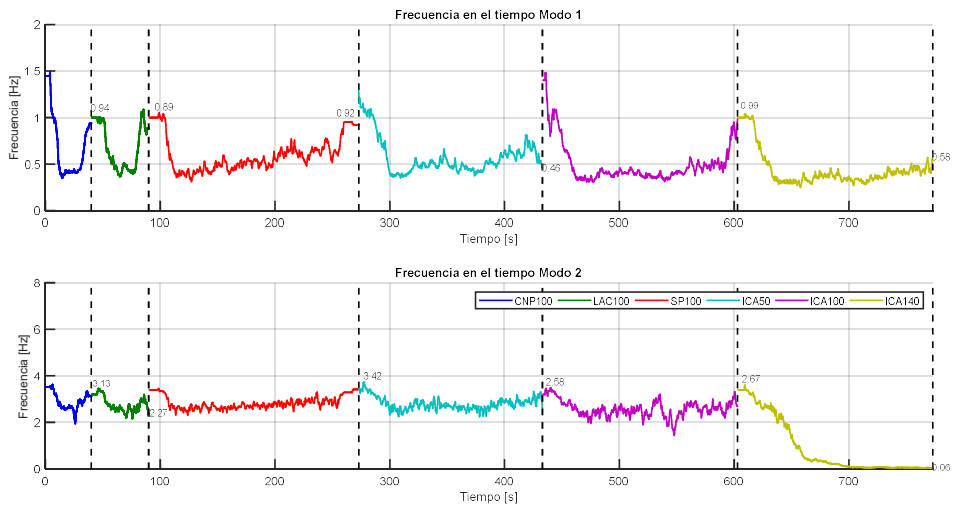


Figura 9-4: Frecuencia en el tiempo todos los registros BI.

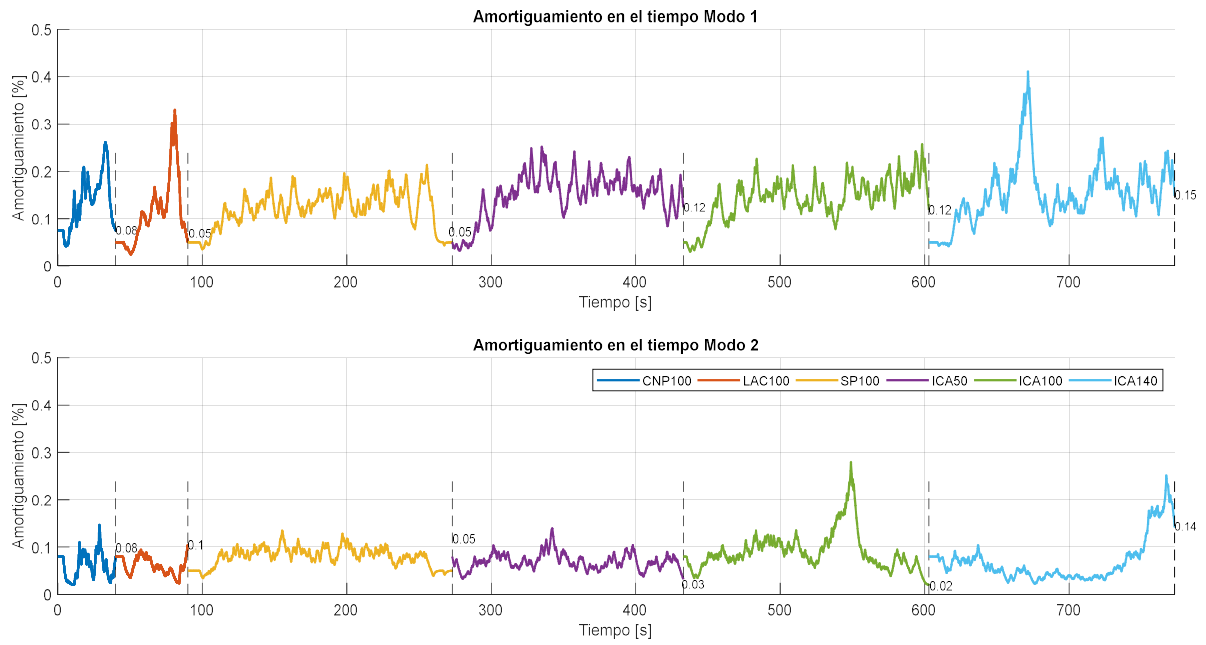


Figura 9-5: Amortiguamiento en el tiempo todos los registros BL.

10 Bibliografía

- Astroza, R., Ebrahimian, H., & Conte, J. P. (2015). Material parameter identification in distributed plasticity FE models of frame-type structures using nonlinear stochastic filtering. *Journal of Engineering Mechanics*, (5), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000851](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000851)
- Astroza, R., Gutiérrez, G., Repenning, C., & Hernández, F. (2018). Time-variant modal parameters and response behavior of a base-isolated building tested on a shake table. *Earthquake Spectra*, 34(1), 121–143. <https://doi.org/10.1193/032817EQS054M>
- Carreño, R. P., & Boroschek, R. L. (2002). Modal parameter variations due to earthquakes of different intensities Rodrigo. *Civil Engineering*, 4(April 2016), 321–333. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9316-8>
- Carreño Vallejos, R. P. (2009). *VARIACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DEL EDIFICIO DE LA CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN: CASO SÍSMICO Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.*
- Ching, J., Beck, J. L., Porter, K. A., & Shaikhutdinov, R. (2015). *Bayesian State Estimation Method for Nonlinear Systems and Its Application to Recorded Seismic Response*. 9399(August), 396–410. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2006\)132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132)
- Congdon, J., Skurdal, A., Hahn, A., & Sturdy, C. (2017). *Submission Files Included in this PDF Research Data Related to this Submission Christopher B . Sturdy.*
- Díaz, P. (2018). “Analysis of seismic isolated structures by using the multiple substructuring method”, “Análisis de estructuras aisladas con el método de múltiples sub-estructuras.” 1–465.
- Dunand, F., Gueguen, P., Bard, P.-Y., Rodgers, J., & Celebi, M. (2006). Comparison of the dynamic parameters extracted from weak, moderate and strong motion recorded in buildings. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, (September), 3–8.
- Katafygiotis, L. S., & Beck, J. L. (1998). Updating models and their uncertainties. I: Model identifiability. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(4), 463–467. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:4\(463\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:4(463))

11 Anexos

11.1 Anexo: Registro aceleraciones por canal casos base fija

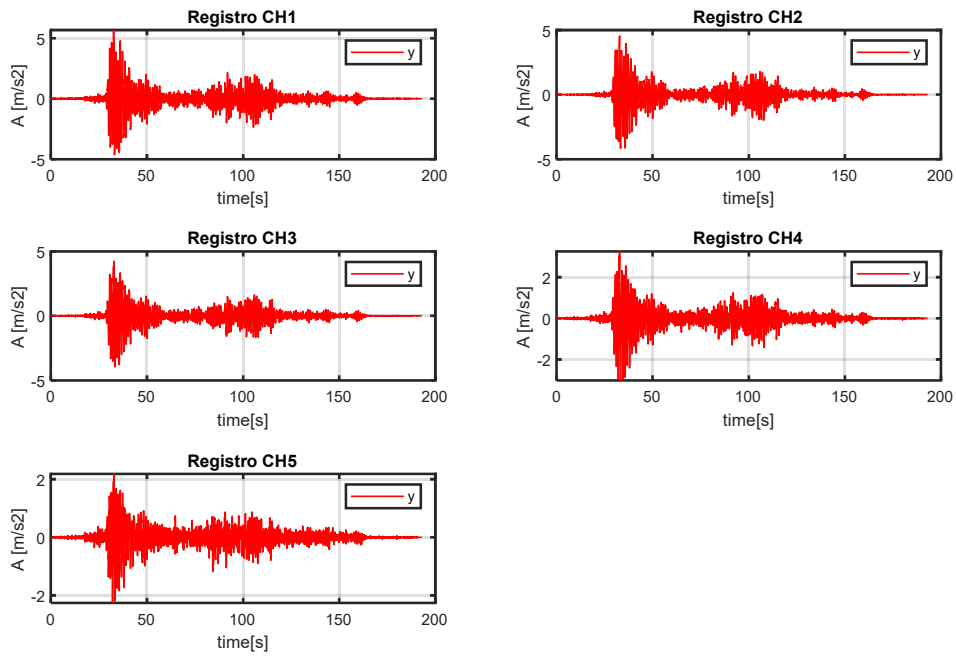


Figura 11-1: Registro aceleraciones cada canal (ICA50 FB)

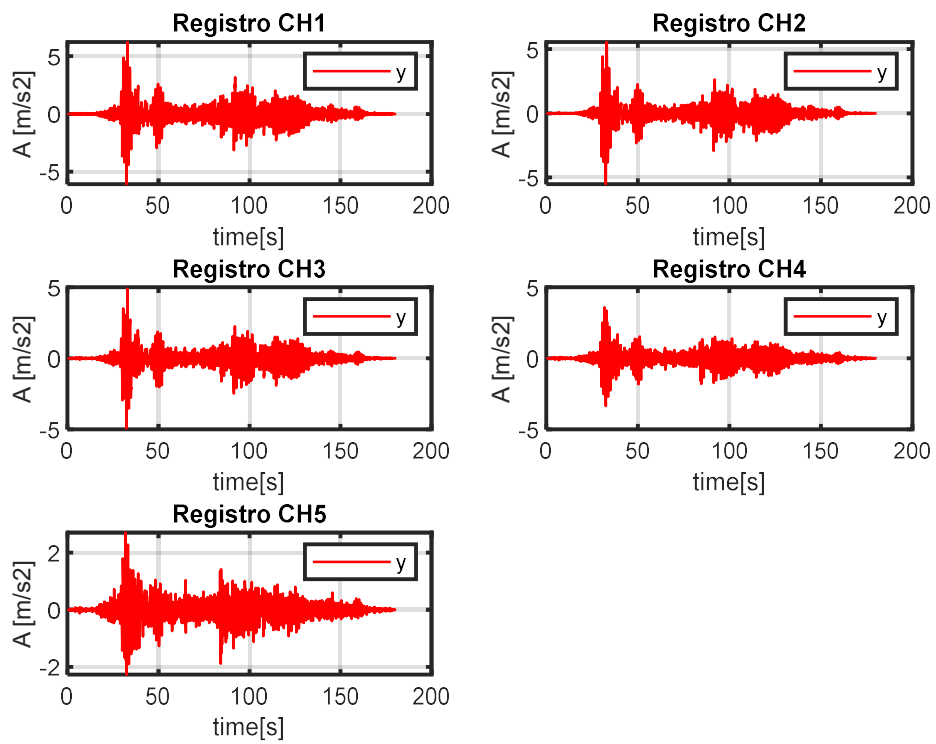


Figura 11-2: Registro aceleraciones cada canal (ICA100 FB)

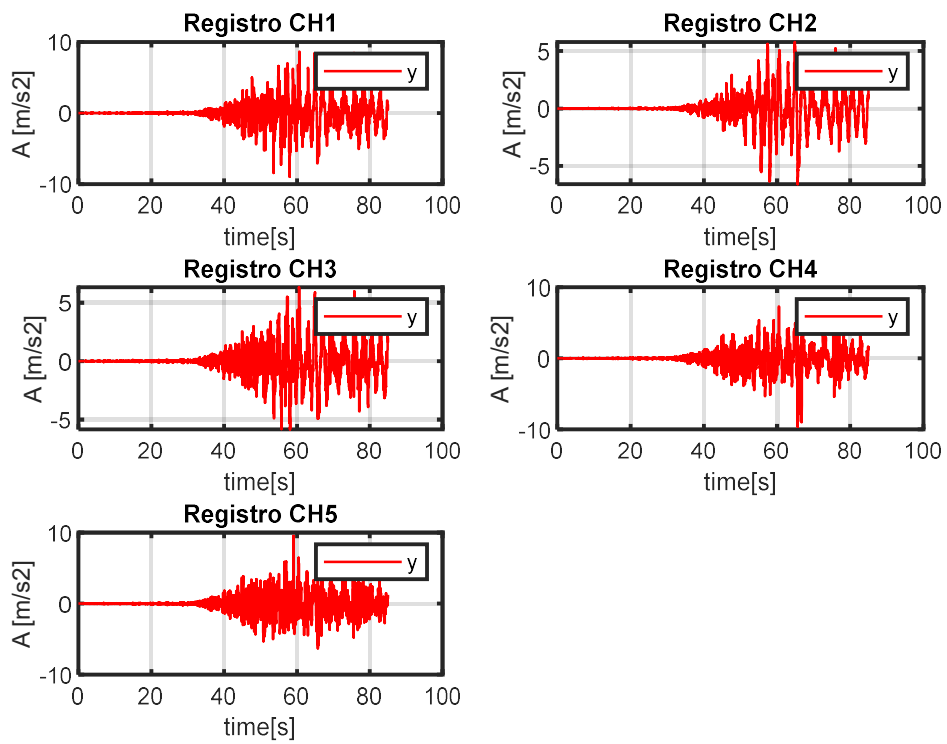


Figura 11-3: Registro aceleraciones cada canal (DEN100 FB)

11.2 Anexo: Registro aceleraciones por canal casos base aislada

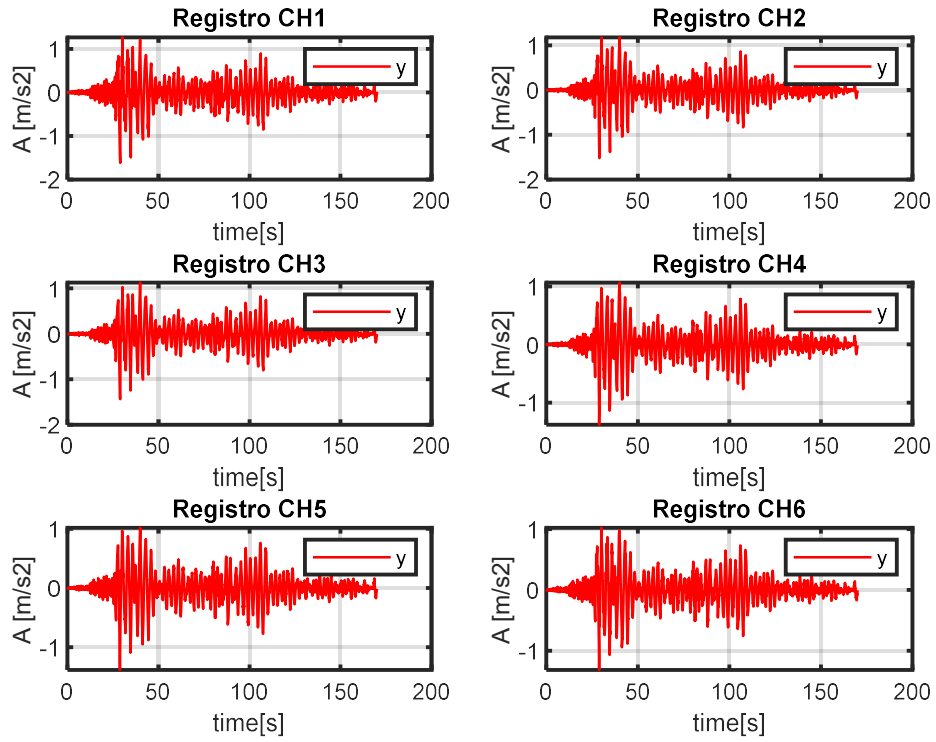


Figura 11-4: Registro aceleraciones cada canal (ICA100)

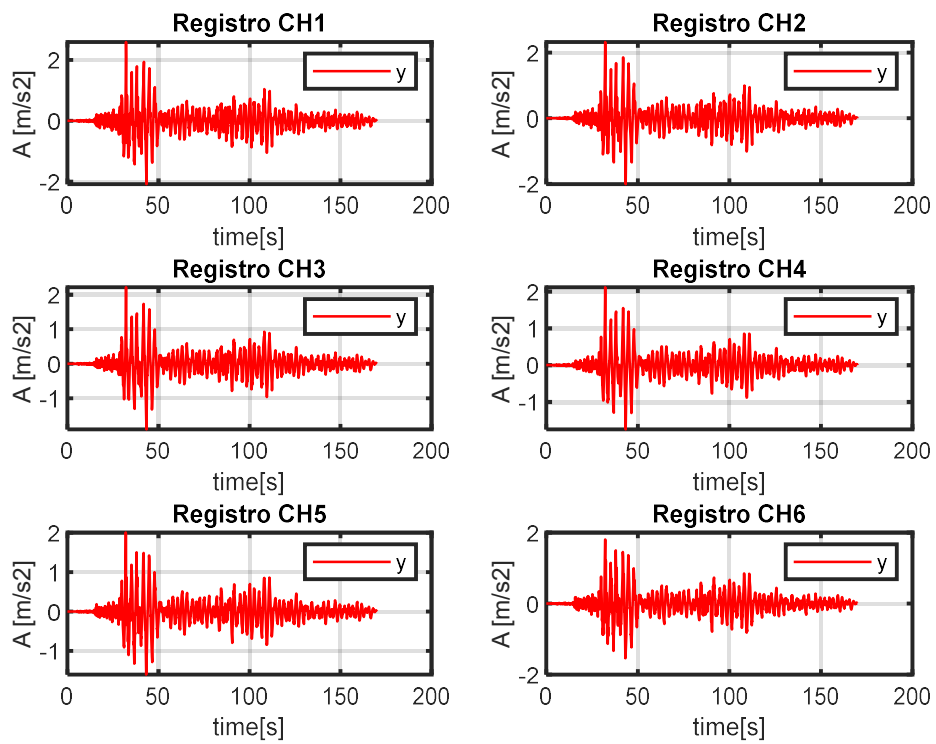


Figura 11-5: Registro aceleraciones cada canal (ICA140)

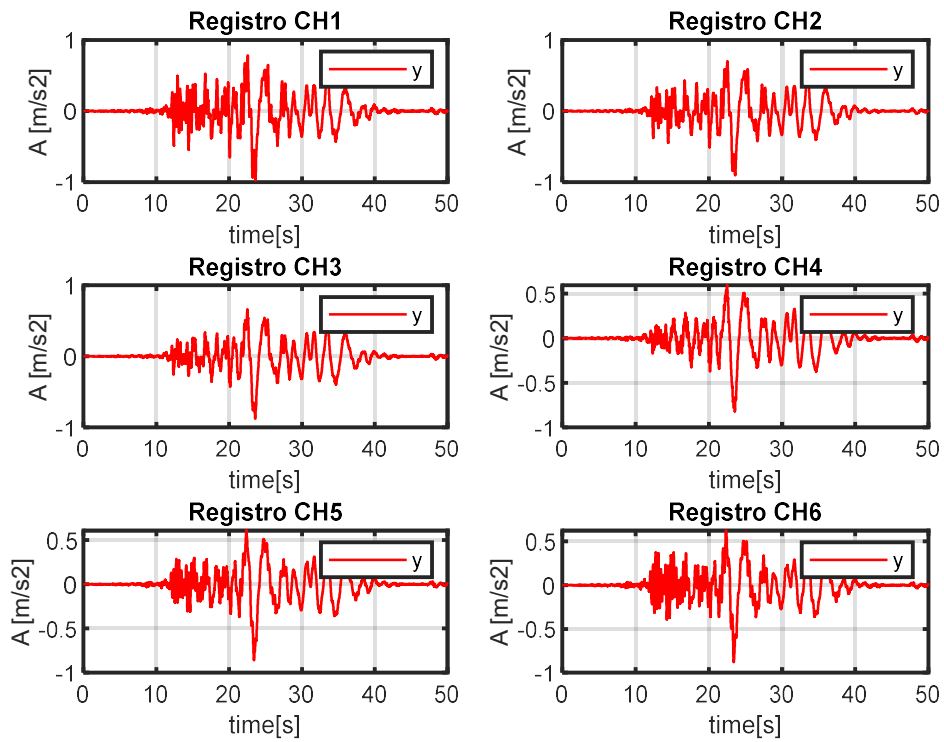


Figura 11-6: Registro aceleraciones cada canal (LAC100)

11.3 Anexo: Covarianza utilizada registros base fija

Tabla 11-1: Desviación covarianza caso ICA50 FB

	Frecuencia [s]	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$
Modo 1	0.01	0.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 2	0.02	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 3	0.03	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Tabla 11-2: Desviación covarianza caso ICA100 FB

	Frecuencia [s]	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$
Modo 1	0.01	0.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 2	0.02	0.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 3	0.03	0.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Tabla 11-3: Desviación covarianza caso DEN100 FB

	Frecuencia [s]	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$
Modo 1	0.01	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 2	0.02	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Modo 3	0.03	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

11.4 Anexo: Covarianza utilizada registros base aislada

Tabla 11-4: Desviación covarianza caso ICA50

	Frecuencia	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$	$\varphi_{6,n}$
Modo 1	0.01	0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Modo 2	0.02	0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Tabla 11-5: Desviación covarianza caso ICA100

	Frecuencia	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$	$\varphi_{6,n}$
Modo 1	0.04	0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Modo 2	0.04	0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Tabla 11-6: Desviación covarianza caso ICA100

	Frecuencia	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$	$\varphi_{6,n}$
Modo 1	0.01	0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Modo 2	0.02	0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Tabla 11-7: Desviación covarianza caso ICA140

	Frecuencia	Amortiguamiento	$\varphi_{1,n}$	$\varphi_{2,n}$	$\varphi_{3,n}$	$\varphi_{4,n}$	$\varphi_{5,n}$	$\varphi_{6,n}$
Modo 1	0.03	0.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Modo 2	0.02	0.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

11.5 Anexo: Respuestas Calculadas UKF caso base fija

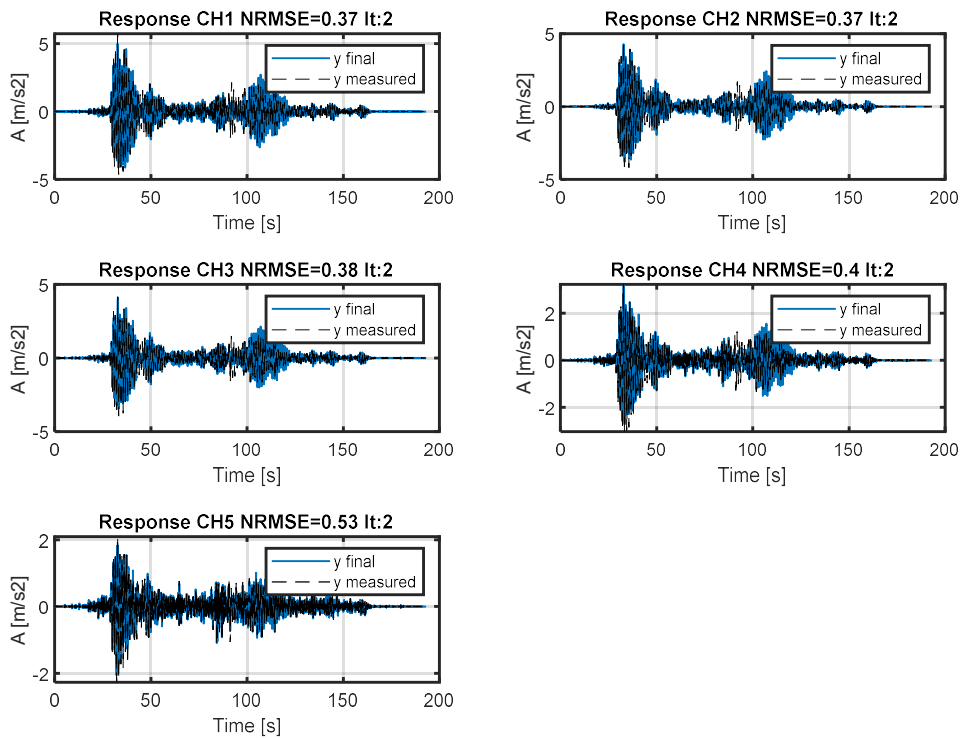


Figura 11-7: Respuesta calculada caso ICA50 FB

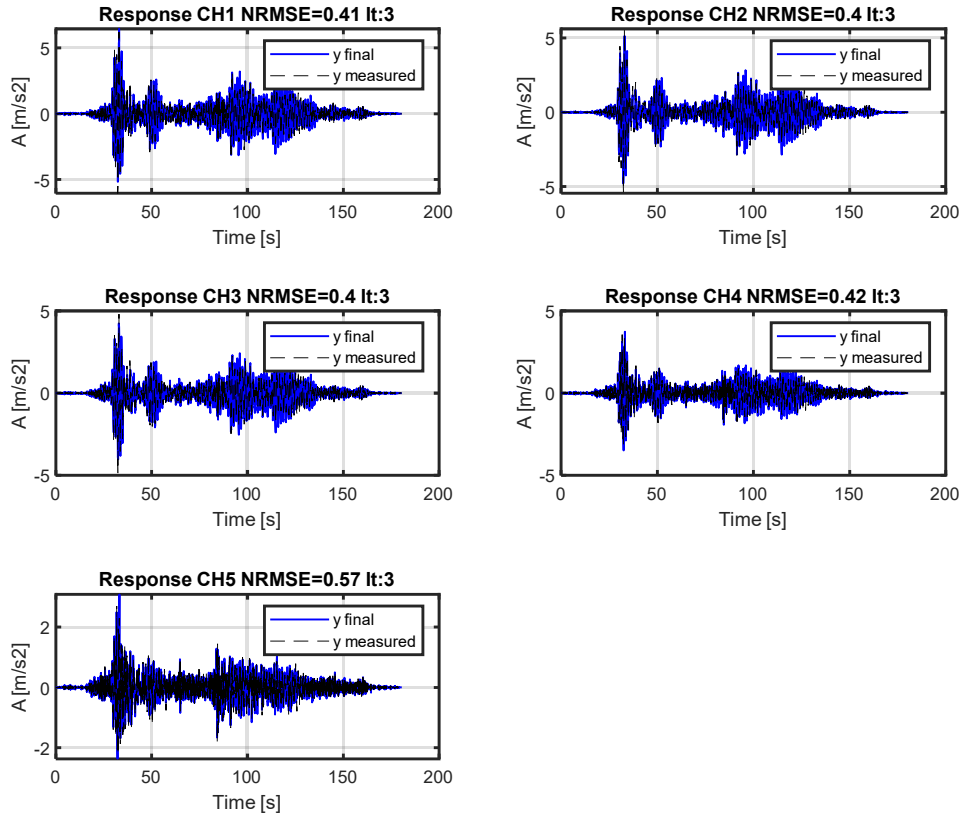


Figura 11-8: Respuesta calculada caso ICA100 FB

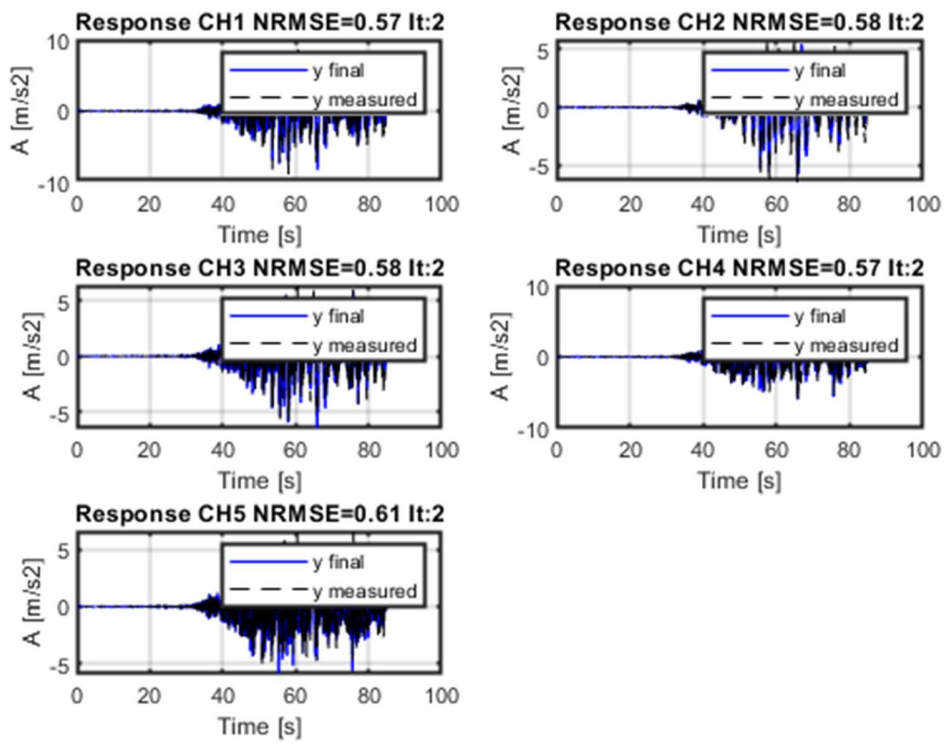


Figura 11-9: Respuesta calculada caso DEN100 FB

11.6 Anexo: Caso respuestas calculadas UKF caso base aislada

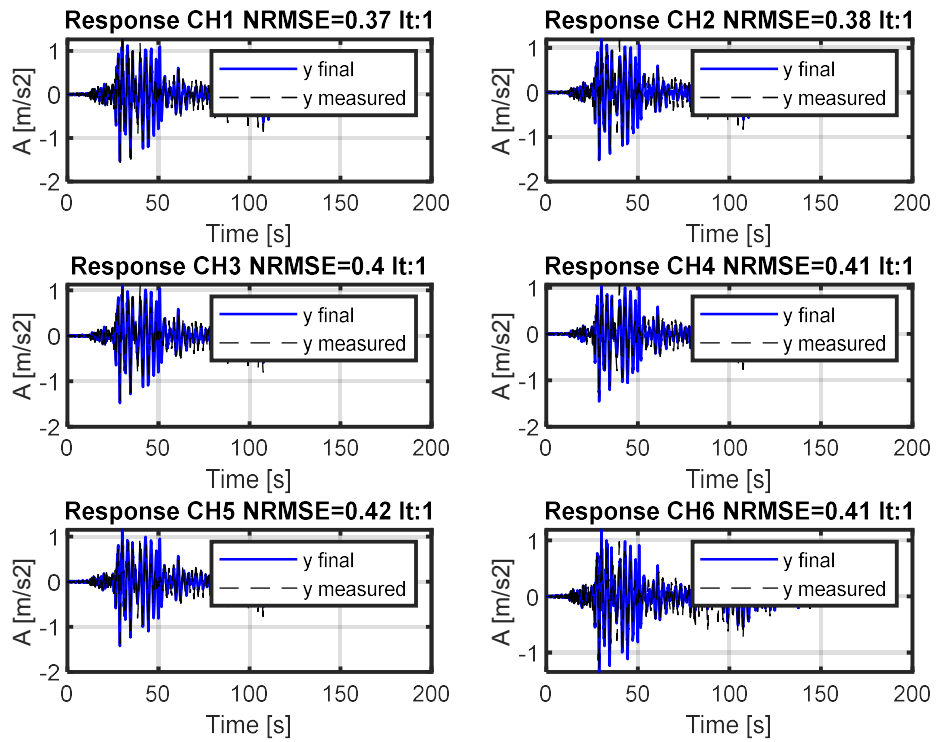


Figura 11-10: Respuesta calculada caso ICA100

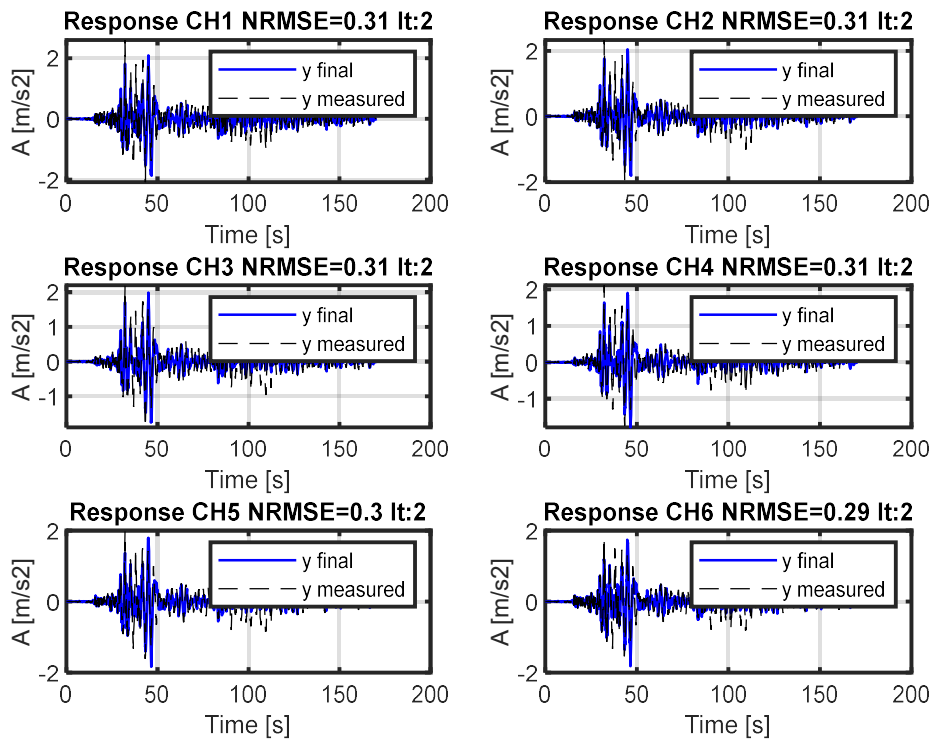


Figura 11-11: Respuesta calculada caso ICA140

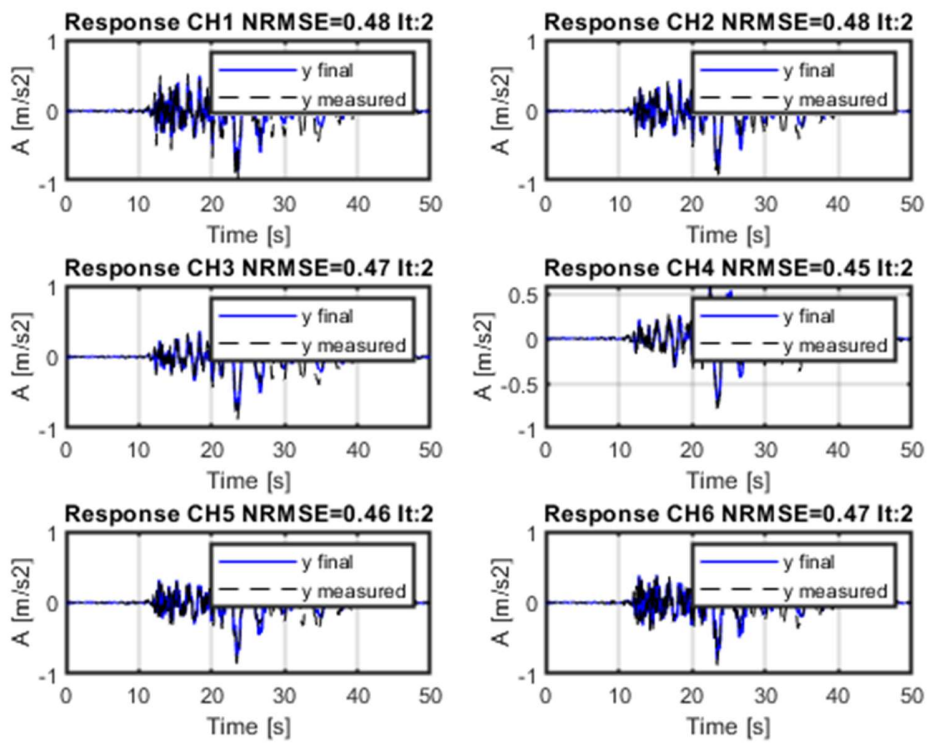


Figura 11-12: Respuesta calculada caso LAC100

11.7 Anexo: PSD Casos Base fija

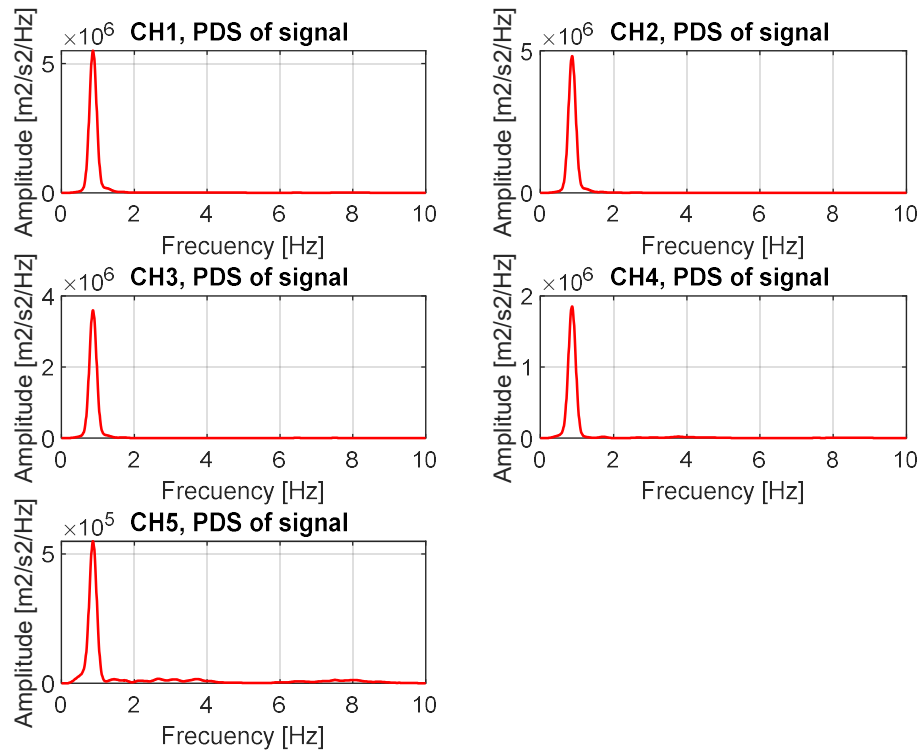


Figura 11-13: PSD (ICA50 FB)

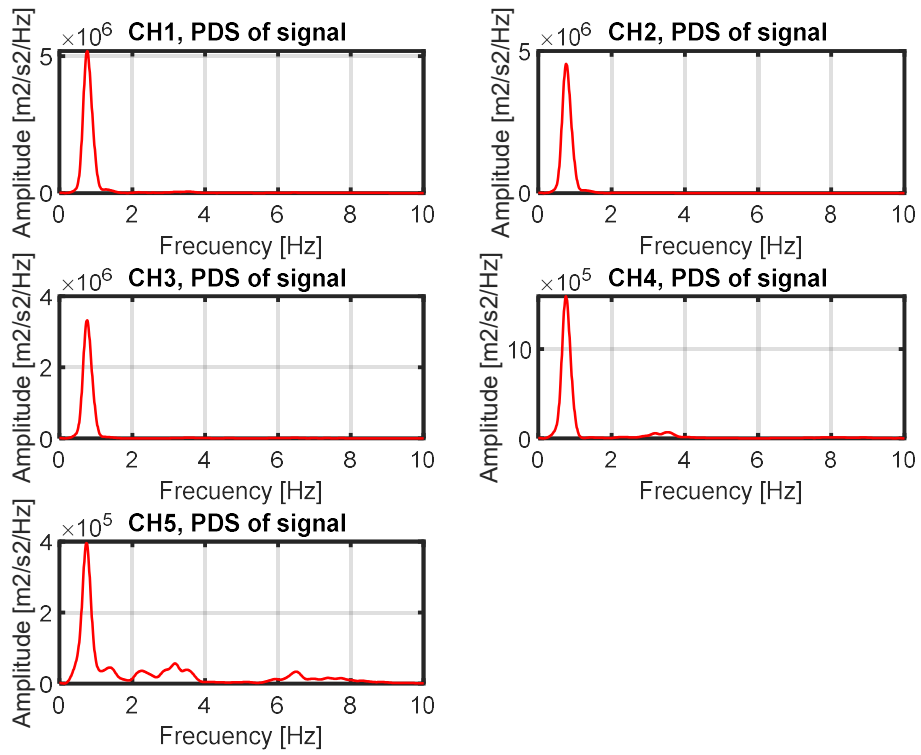


Figura 11-14: PSD (ICA100 FB)

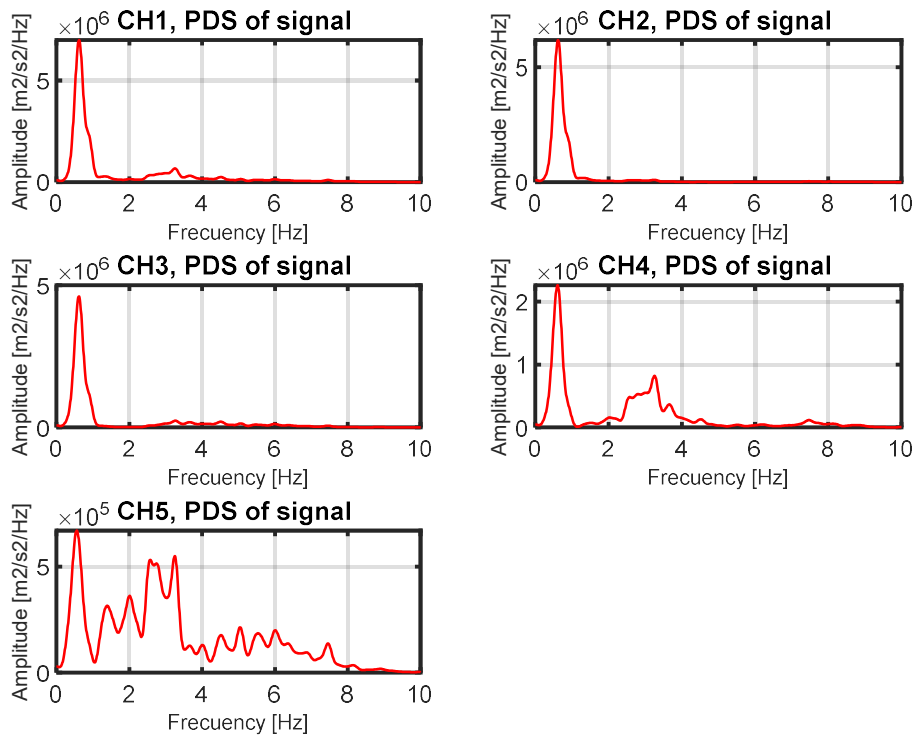


Figura 11-15: PSD (DEN67 FB)

11.8 Anexo: PSD casos Base aislada

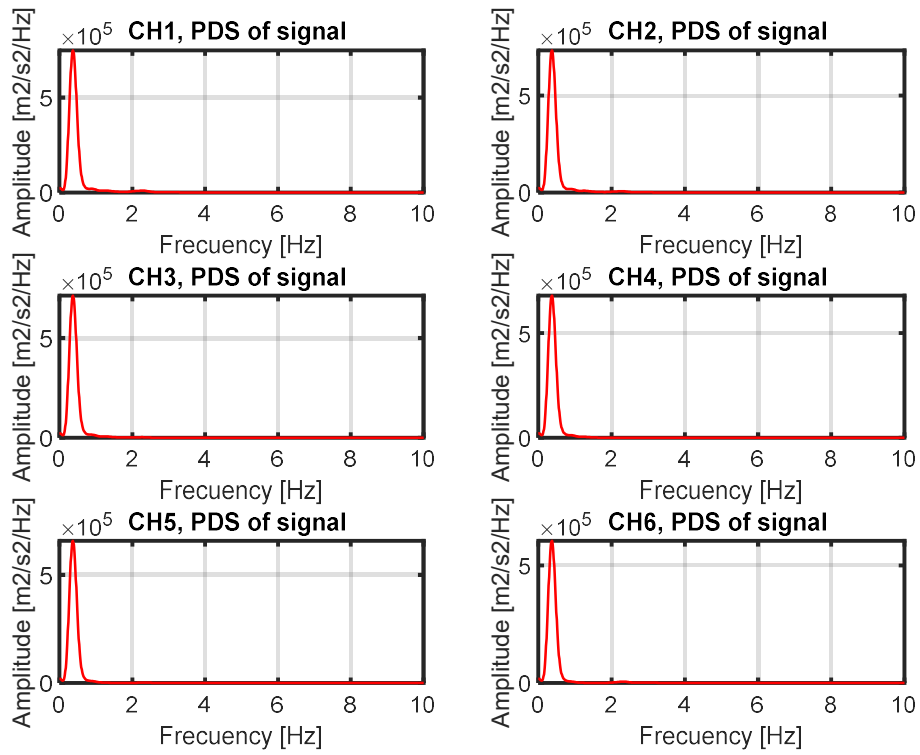


Figura 11-16: PSD (ICA100)

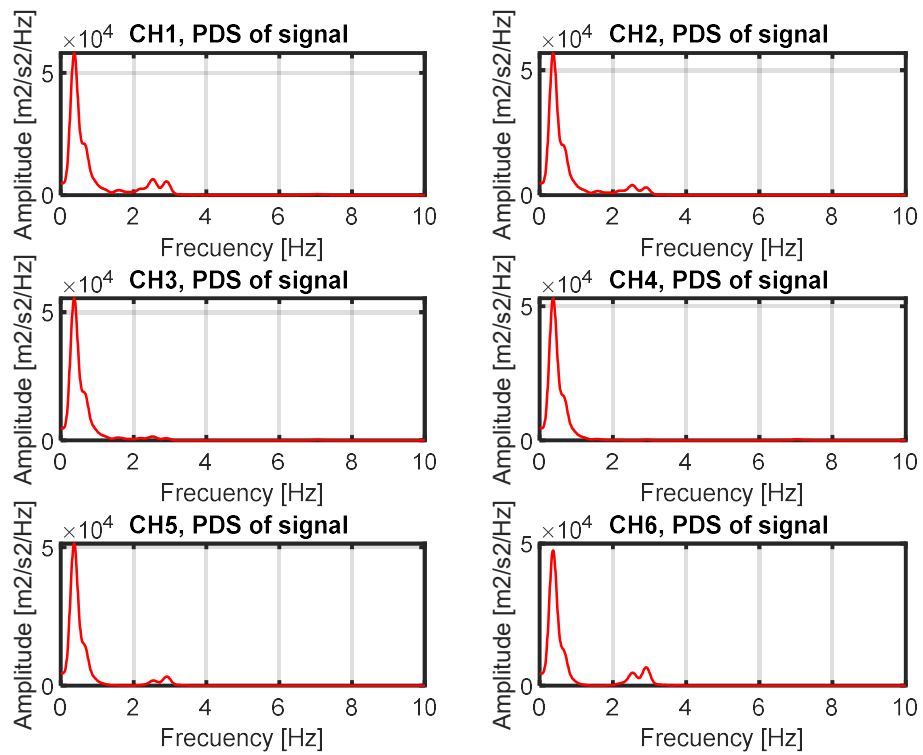


Figura 11-17: PSD (LAC100)

11.9 Anexo: Frecuencias y transferectogramas casos base fija

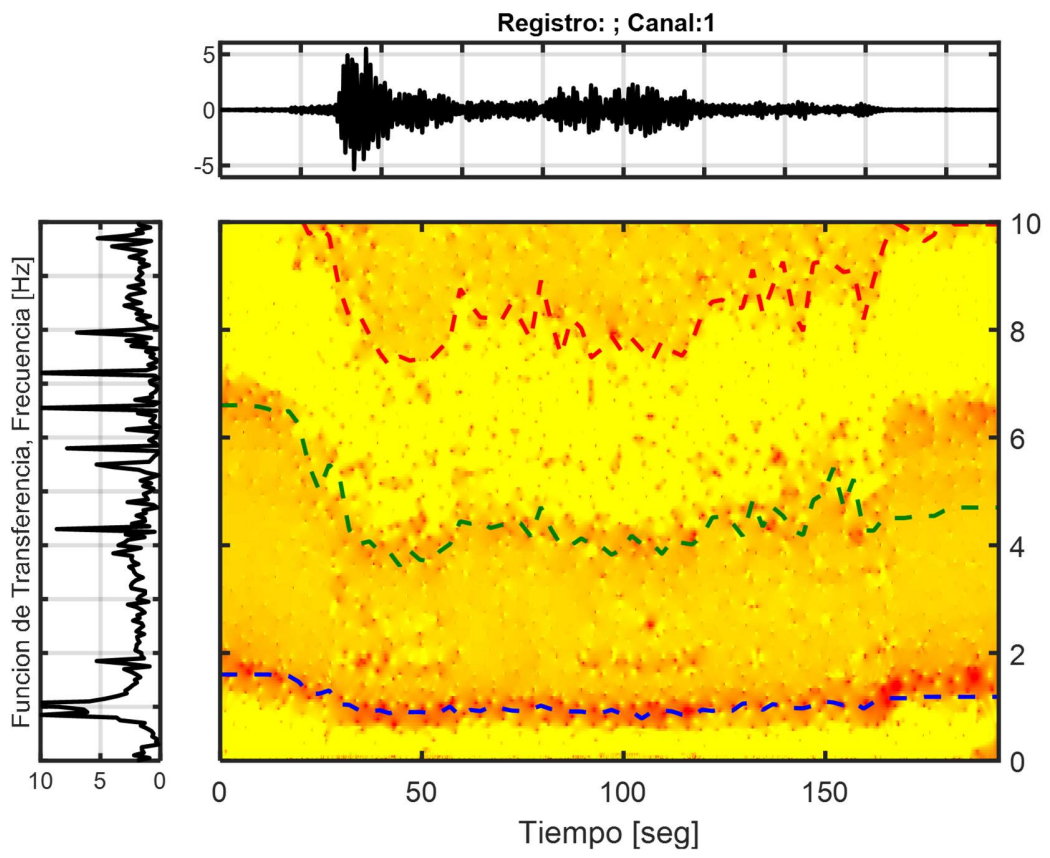


Figura 11-18: Transferectogramas y frecuencias calculadas (ICA50 FB)

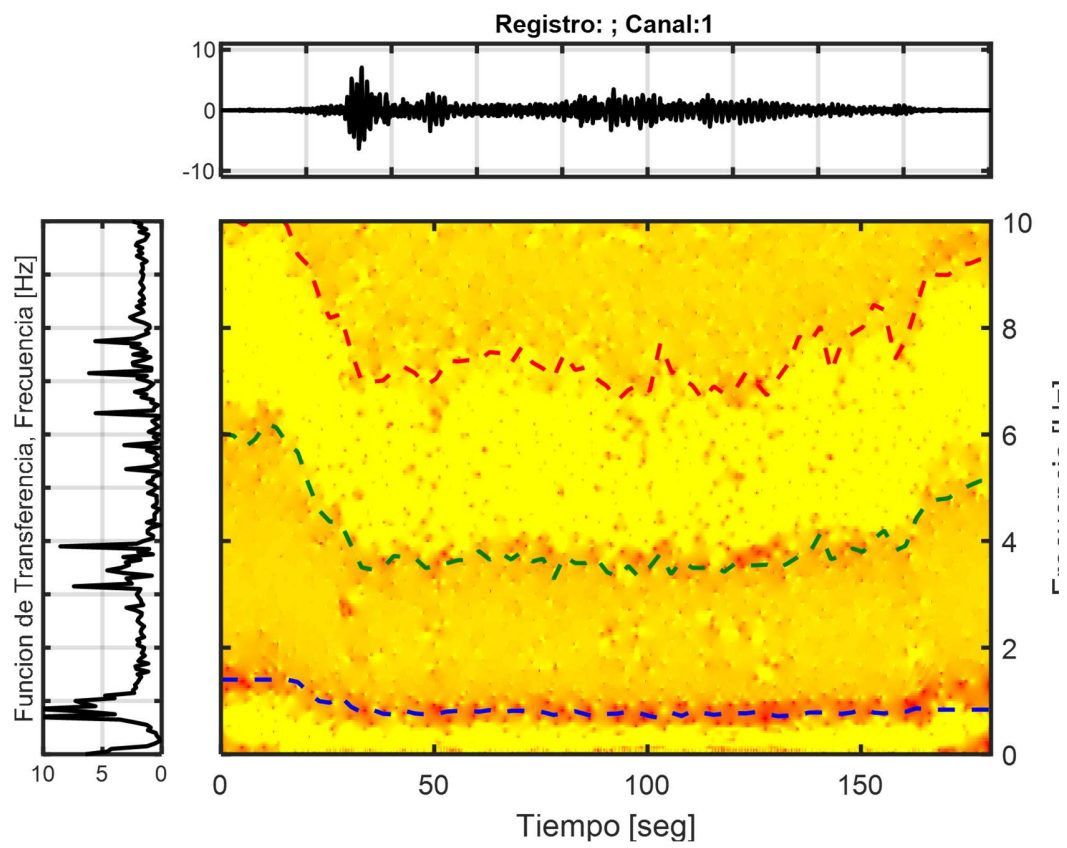


Figura 11-19: Transferectogramas y frecuencias calculadas (ICA100 FB)

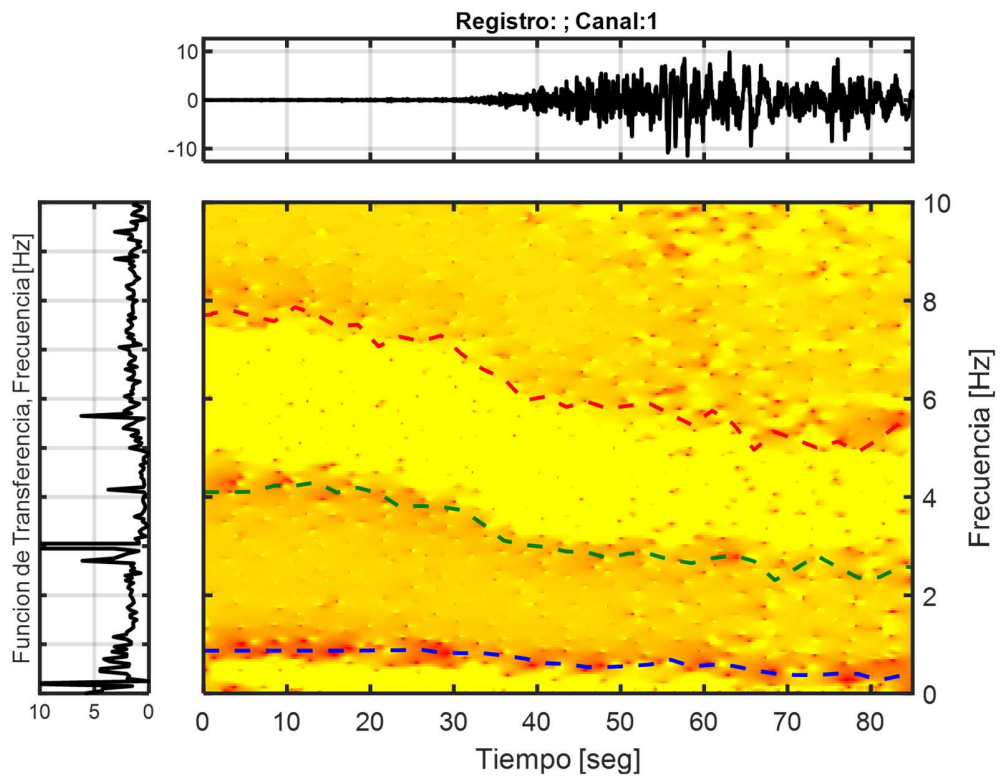


Figura 11-20: Transferectogramas y frecuencias calculadas (DEN100 FB)

11.10 Anexo: Frecuencias y transferectogramas casos base aislada

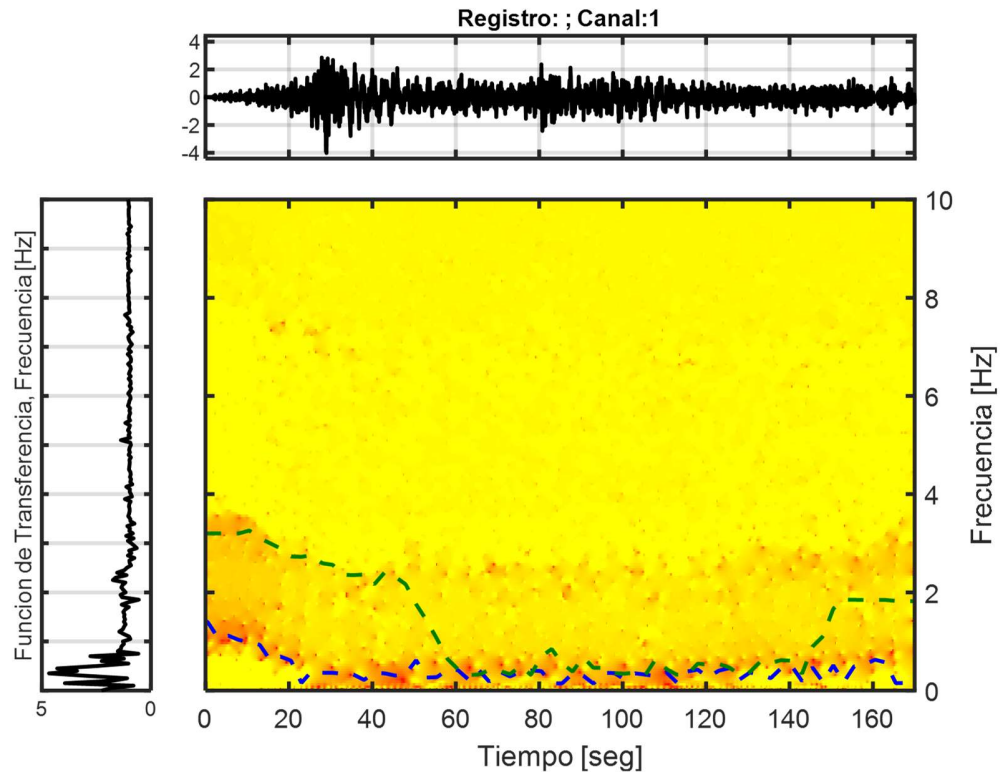


Figura 11-21: Transferectogramas y frecuencias calculadas (ICA100)

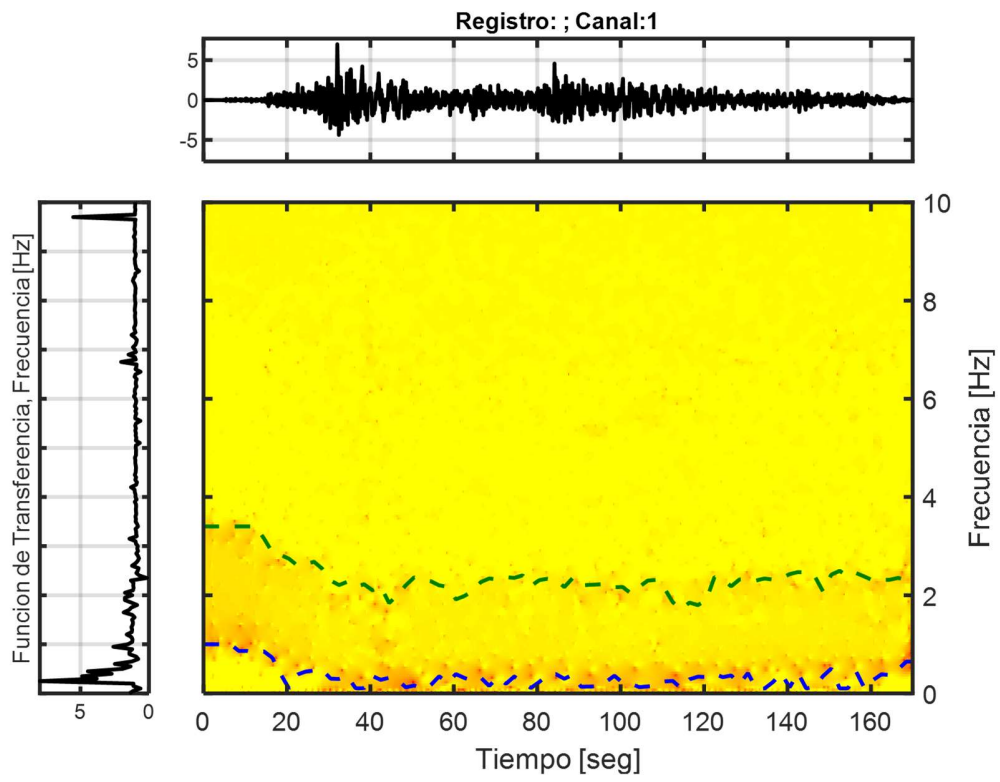


Figura 11-22: Transferectogramas y frecuencias calculadas (ICA140)

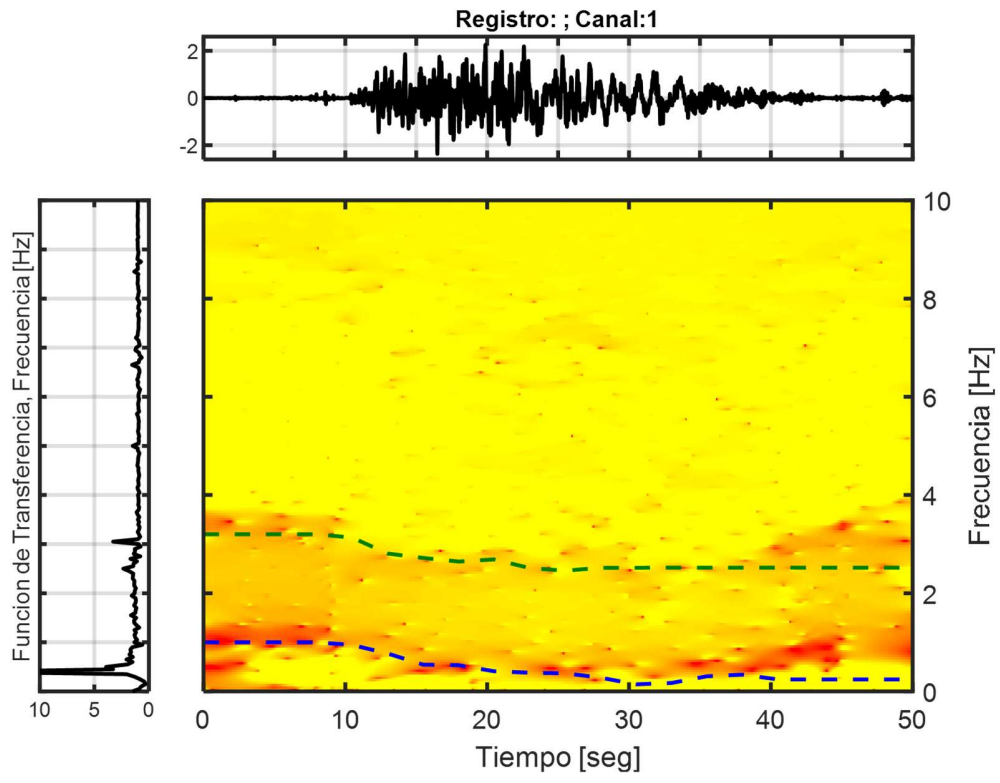


Figura 11-23: Transferectogramas y frecuencias calculadas (LAC100)

11.11 Anexo: Variación parámetros normalizados

11.11.1 Caso ICA50 FB

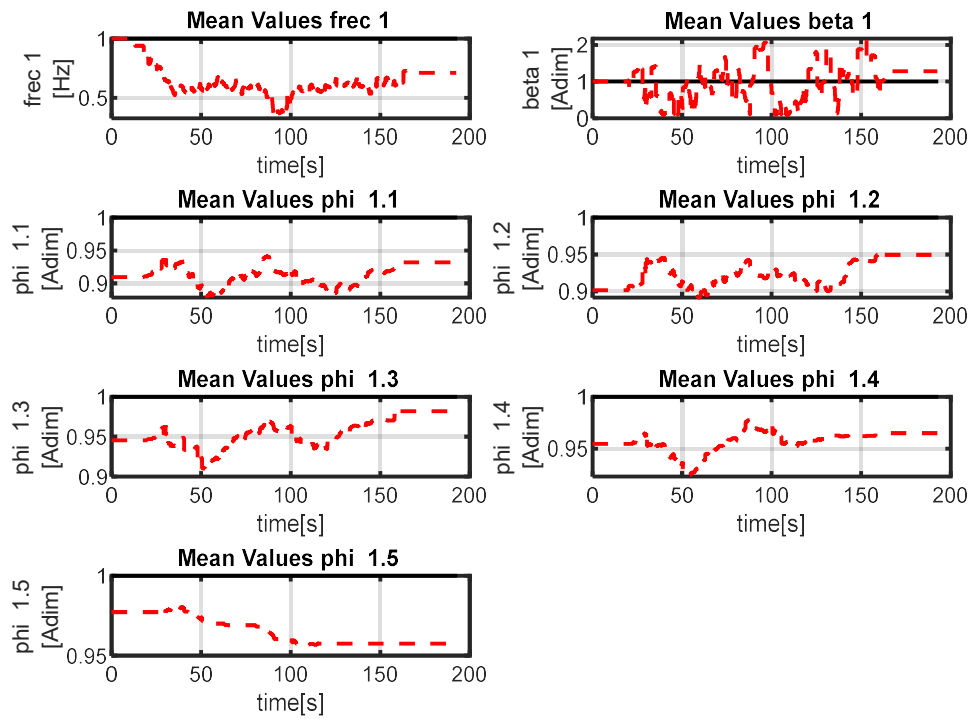


Figura 11-24: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 FB, modo 1)

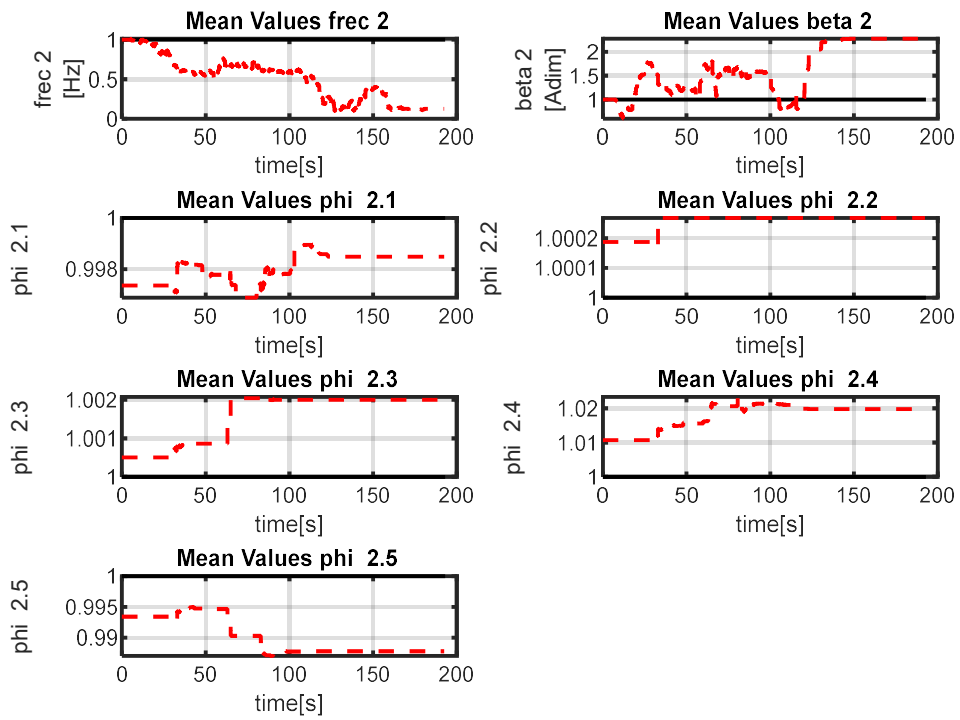


Figura 11-25: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 FB, modo 2)

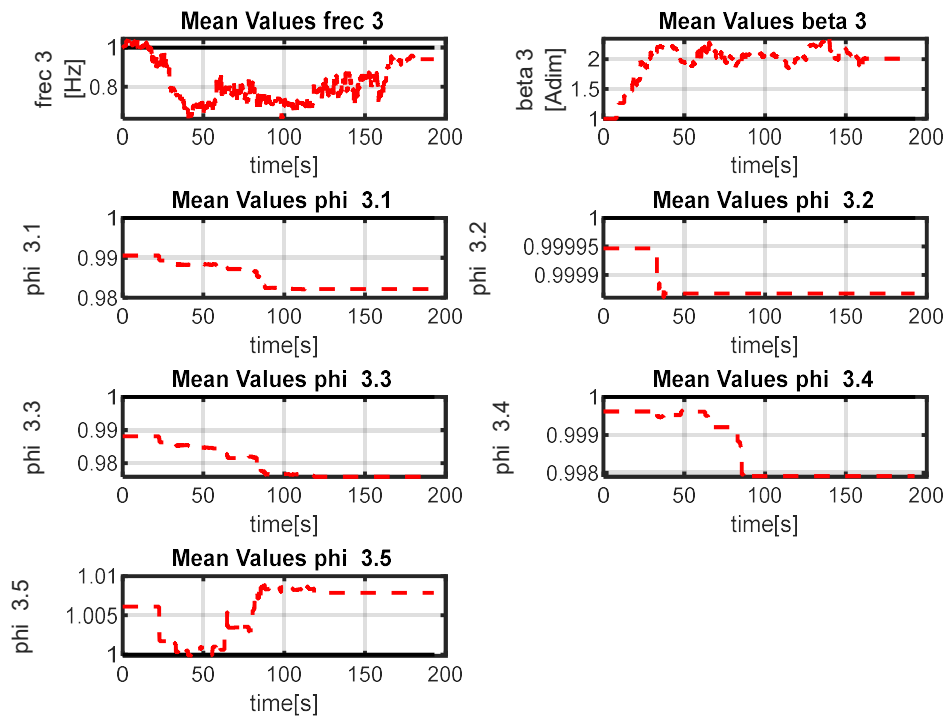


Figura 11-26: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 FB, modo 3)

11.11.2 Anexo: Caso ICA100 FB

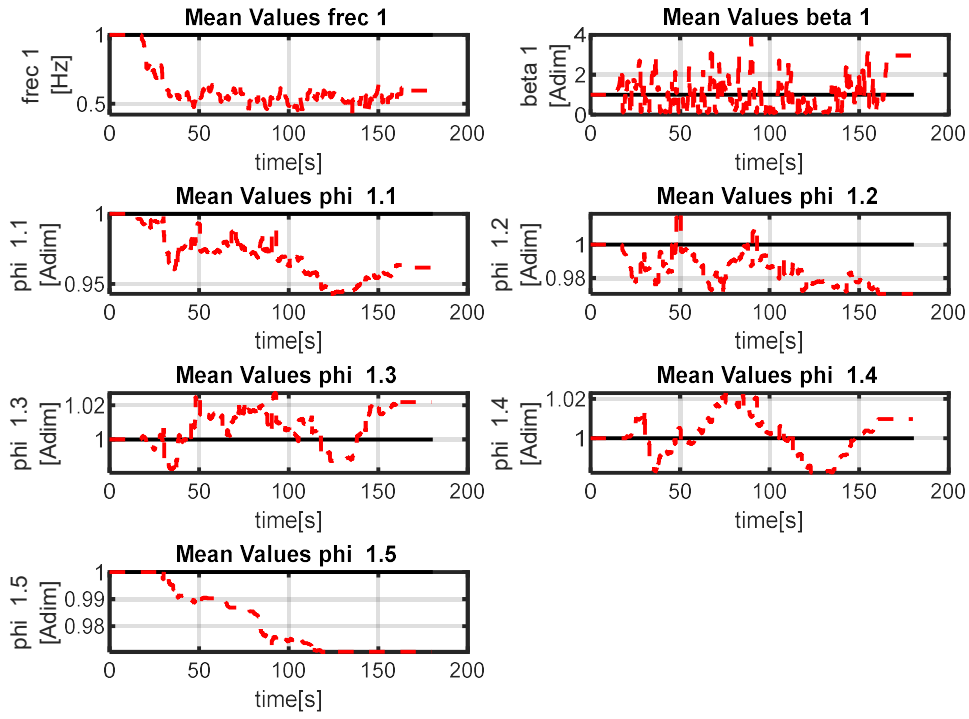


Figura 11-27: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 FB, modo 1)

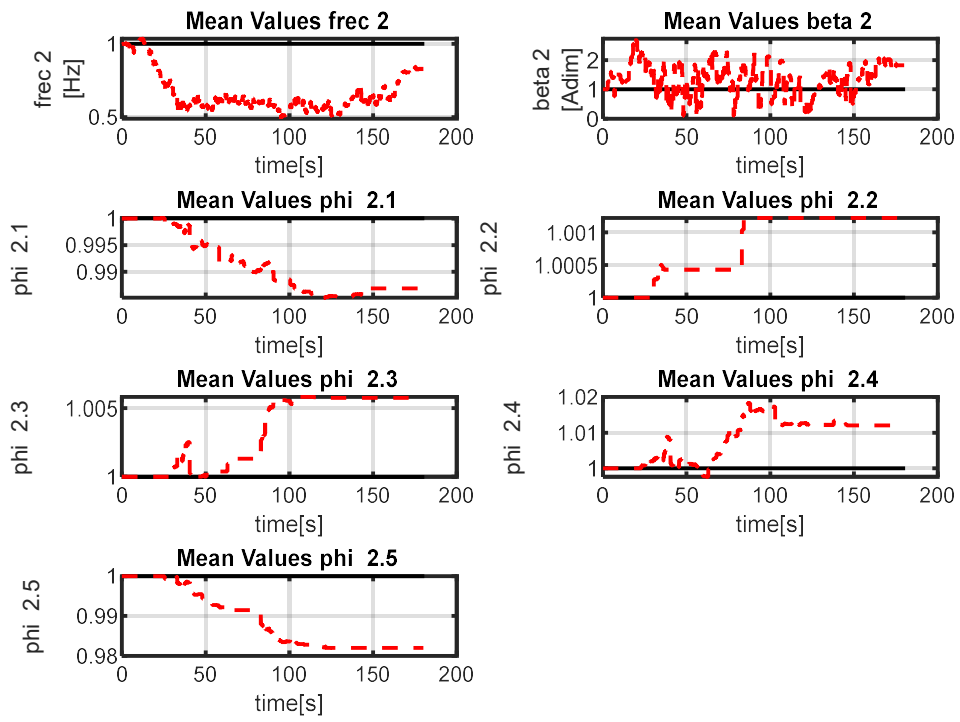


Figura 11-28: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 FB, modo 2)

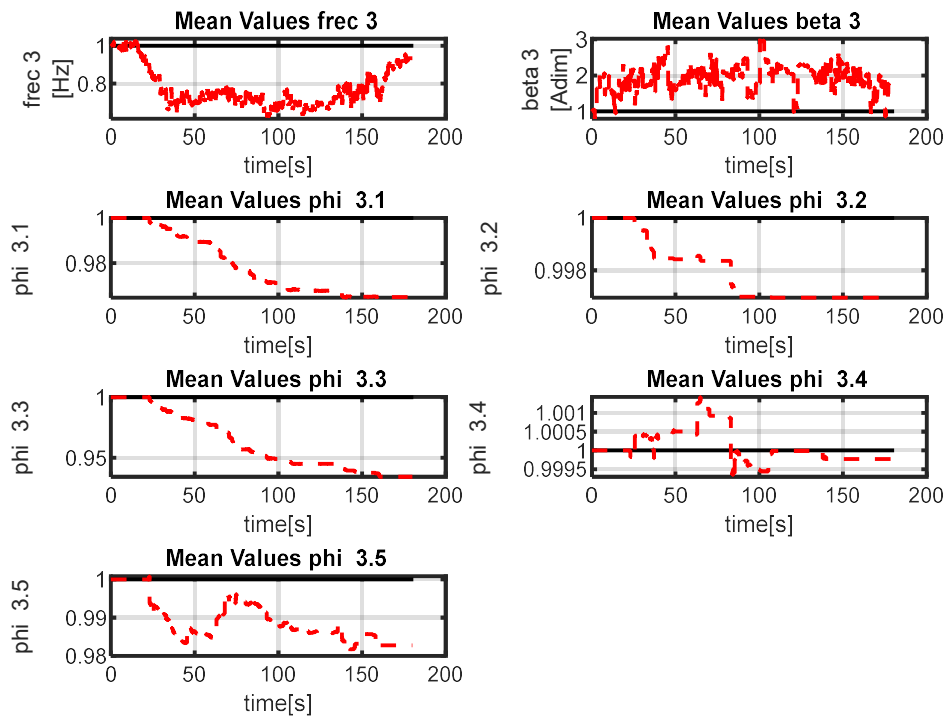


Figura 11-29: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 FB, modo 3)

11.11.3 Anexo: Caso DEN100 FB

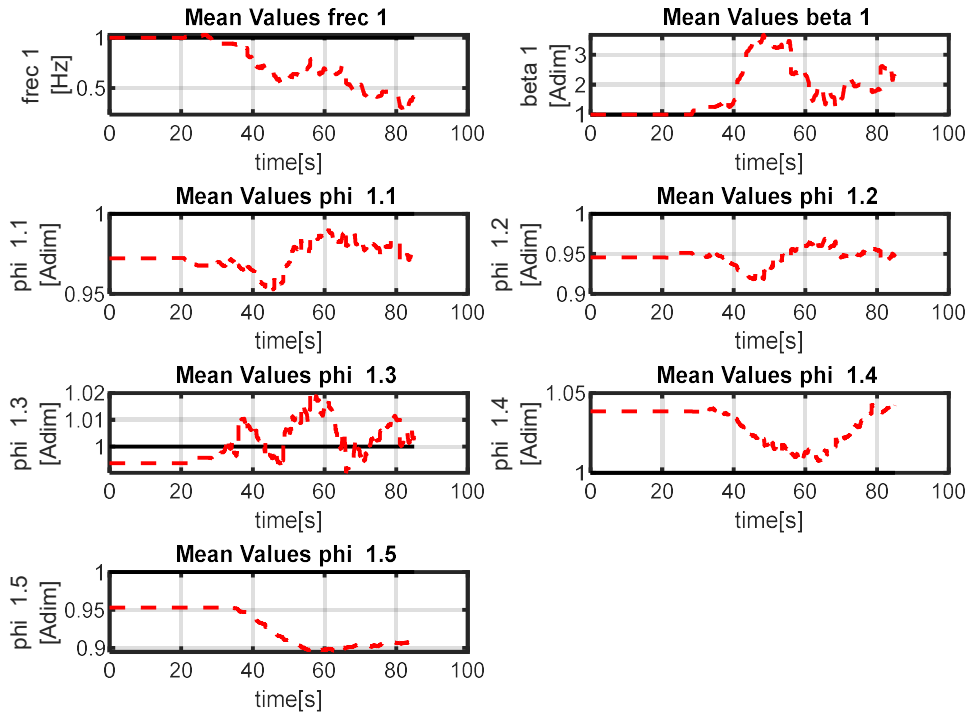


Figura 11-30: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (DEN100 FB, modo 1)

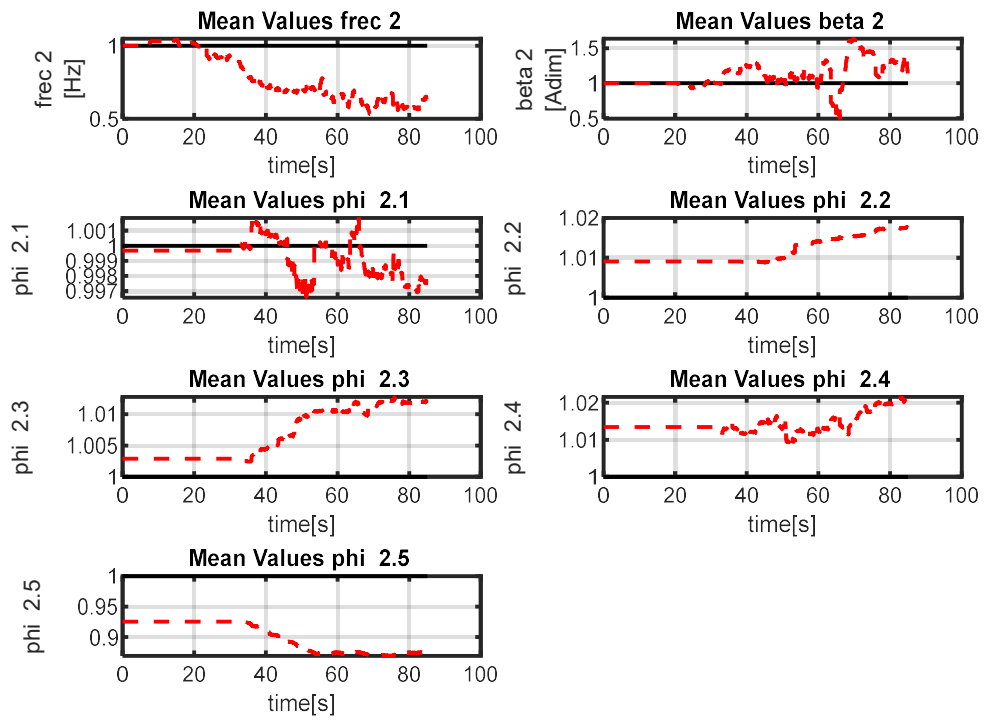


Figura 11-31: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (DEN100 FB, modo 2)

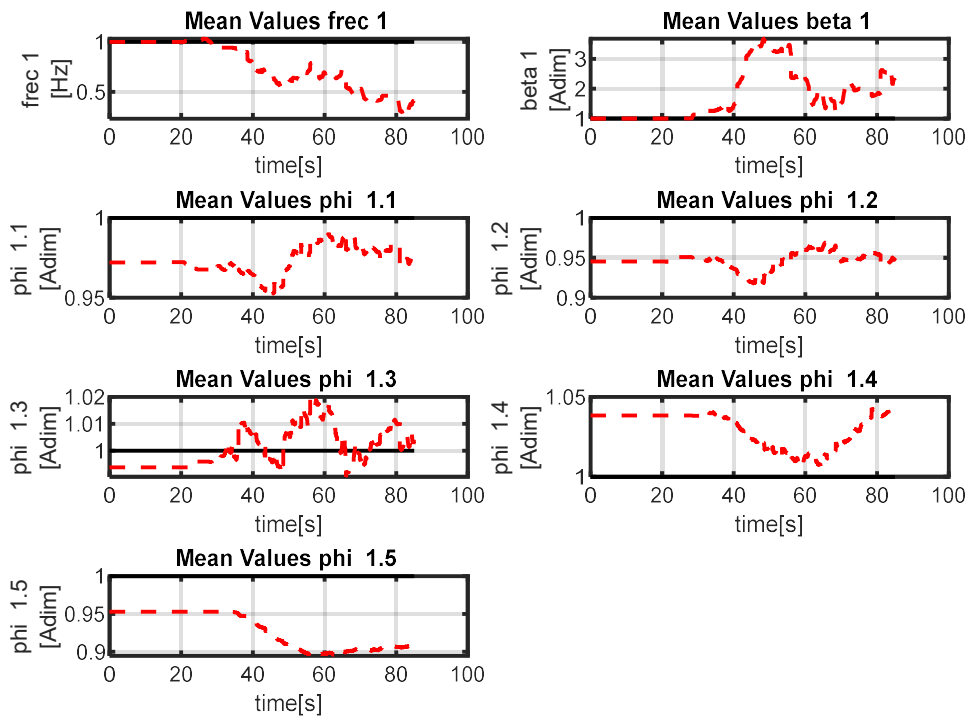


Figura 11-32: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (DEN100 FB, modo 3)

11.11.4 Anexo: Caso ICA50 BI

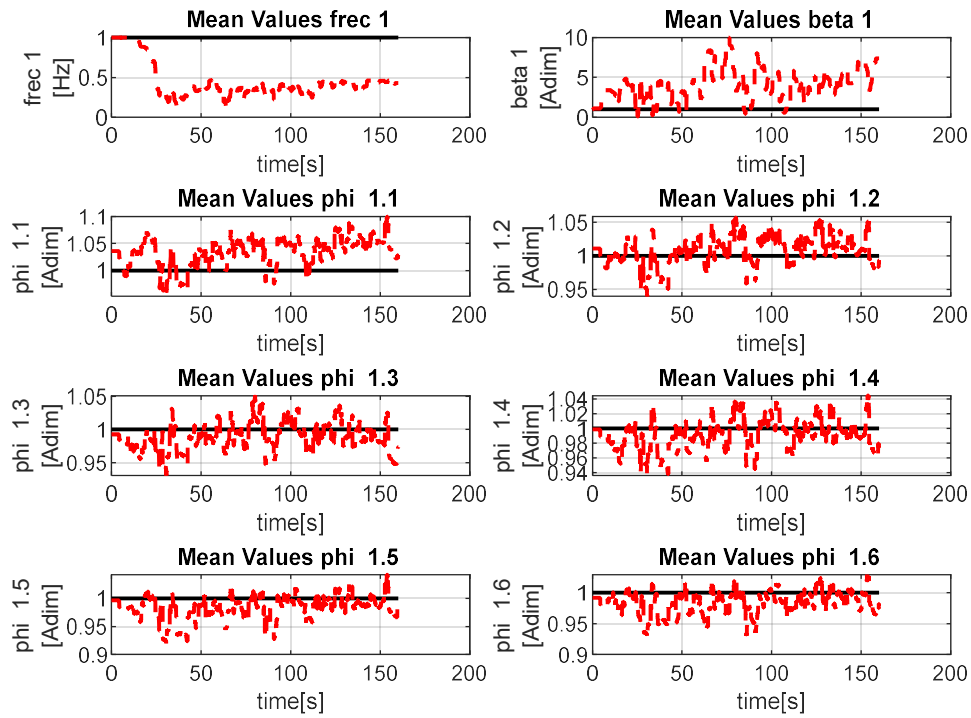


Figura 11-33: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 BI, modo 1)

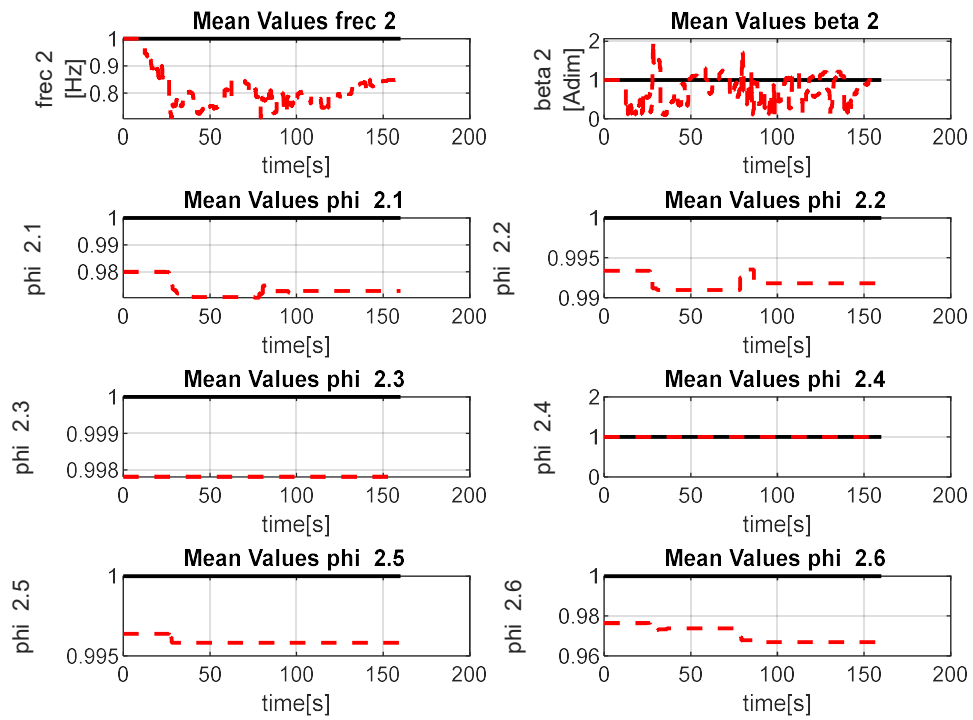


Figura 11-34: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA50 BI, modo 2)

11.11.5 Anexo: Caso ICA100 BI

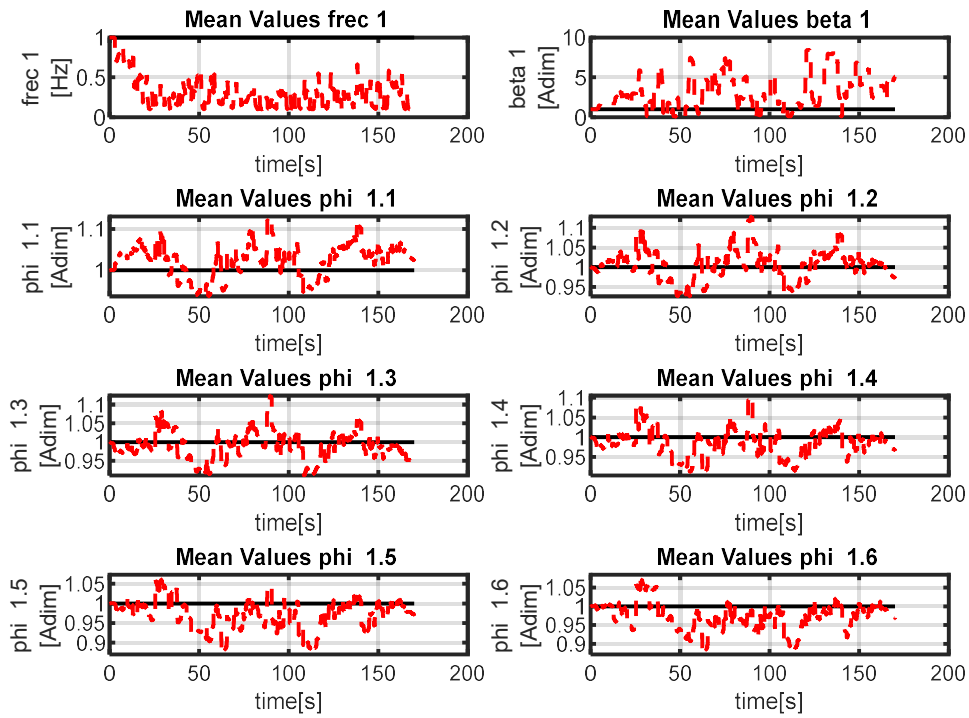


Figura 11-35: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 BI, modo 1)

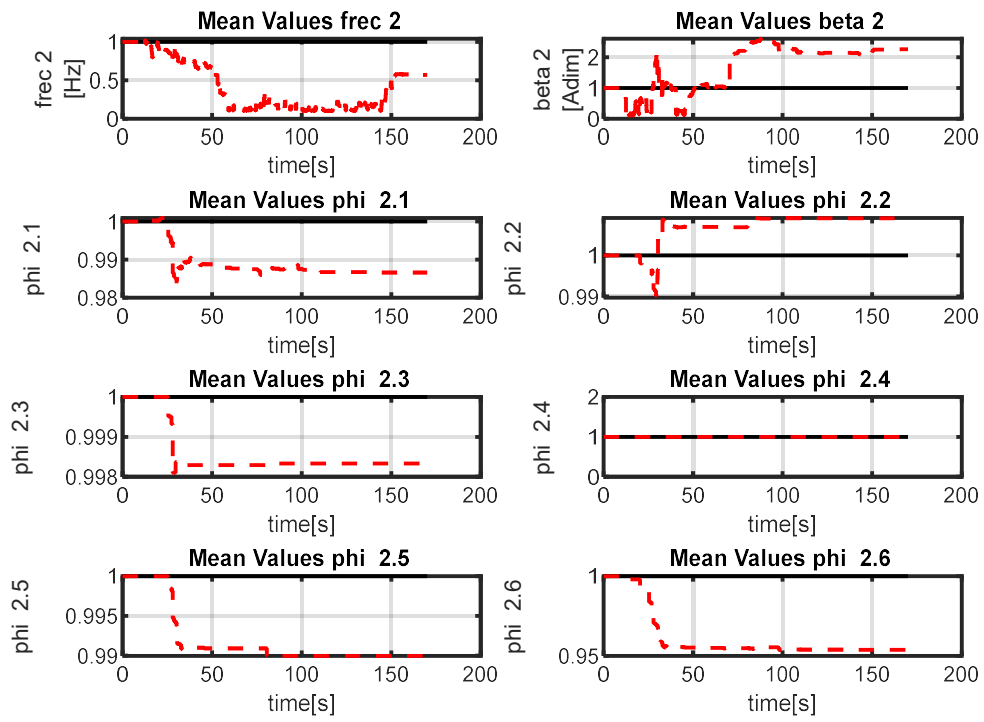


Figura 11-36: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA100 BI, modo 2)

11.11.6 Anexo: Caso ICA140 BI

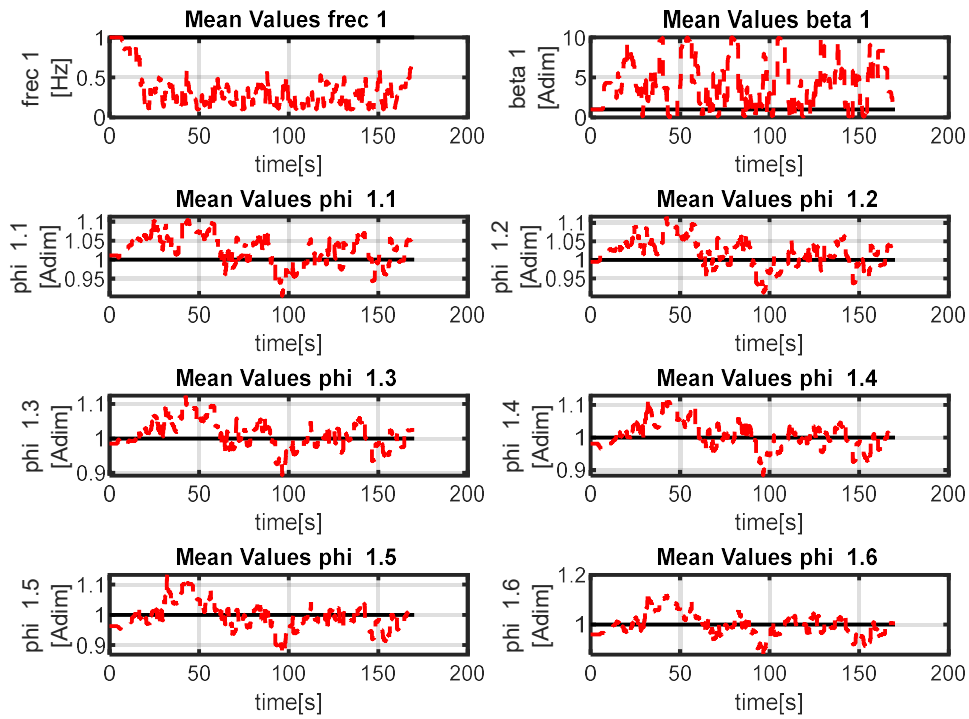


Figura 11-37: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA140 BI, modo 1)

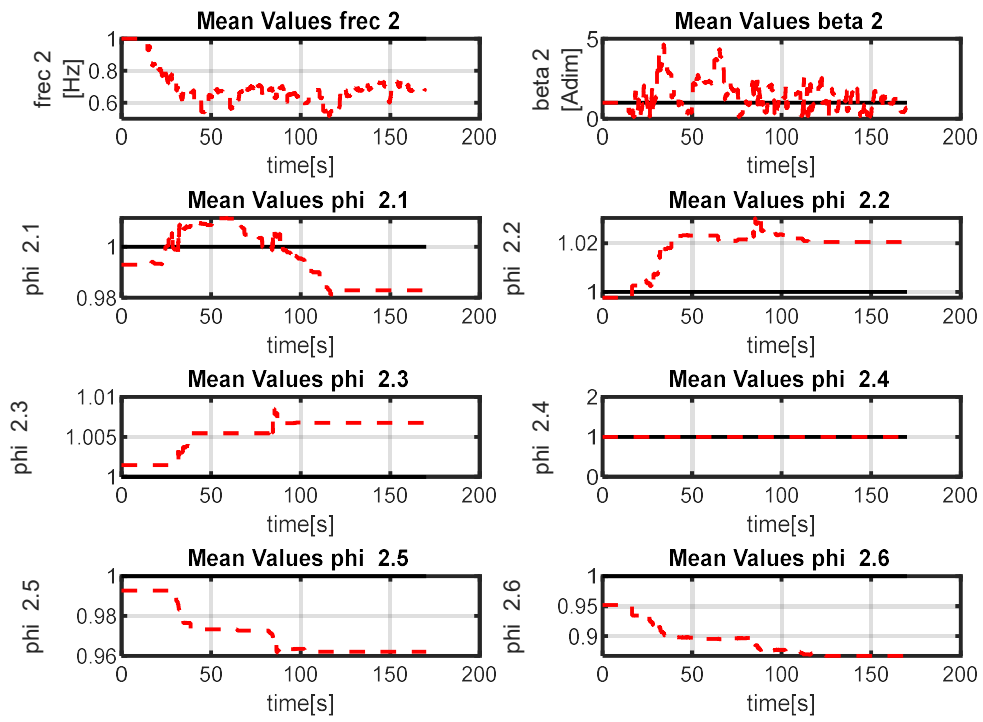


Figura 11-38: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (ICA140 BI, modo 2)

11.11.7 Anexo: Caso ICA140 BI

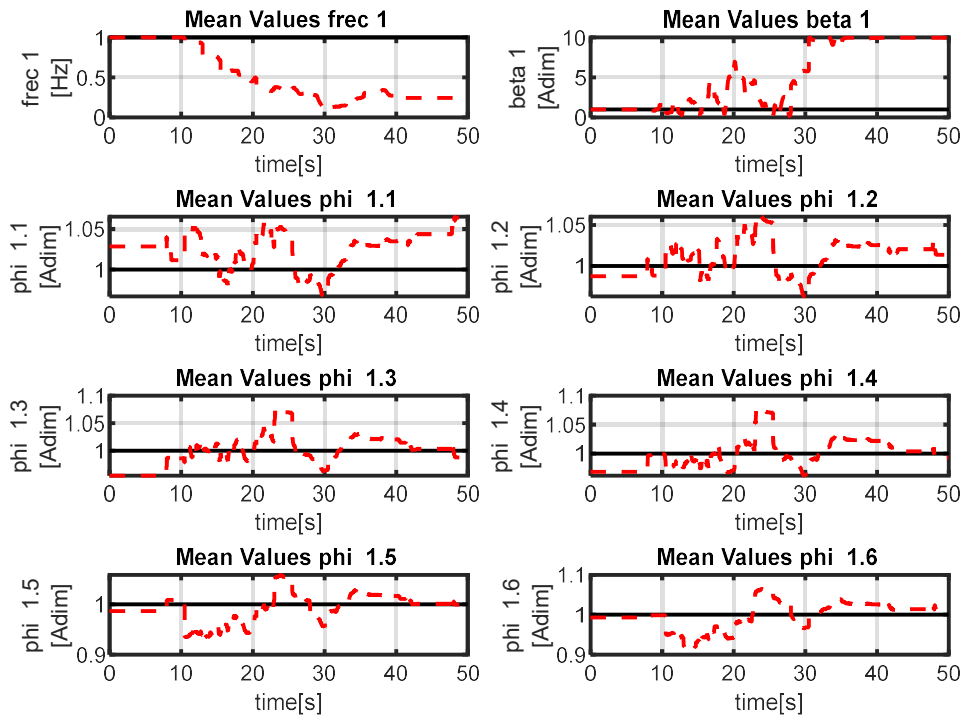


Figura 11-39: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (LAC100 BI, modo 1)

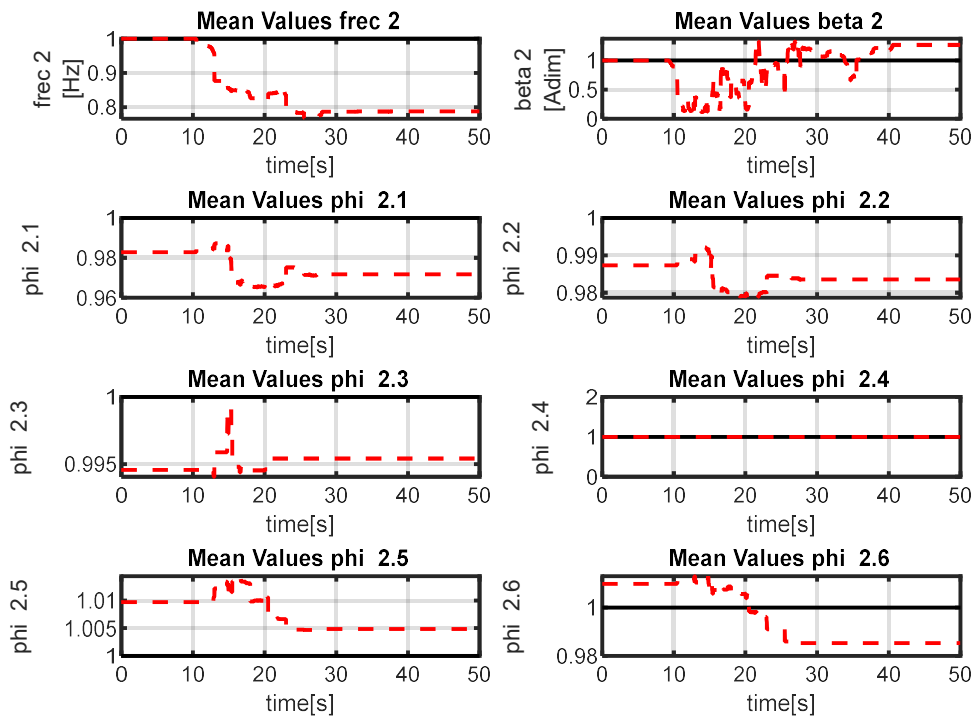


Figura 11-40: Variación en el tiempo parámetros normalizados calculados con UKF (LAC100 BI, modo 2)

11.12 Anexo: Amortiguamientos calculados caso base fija (UKF y N-R)

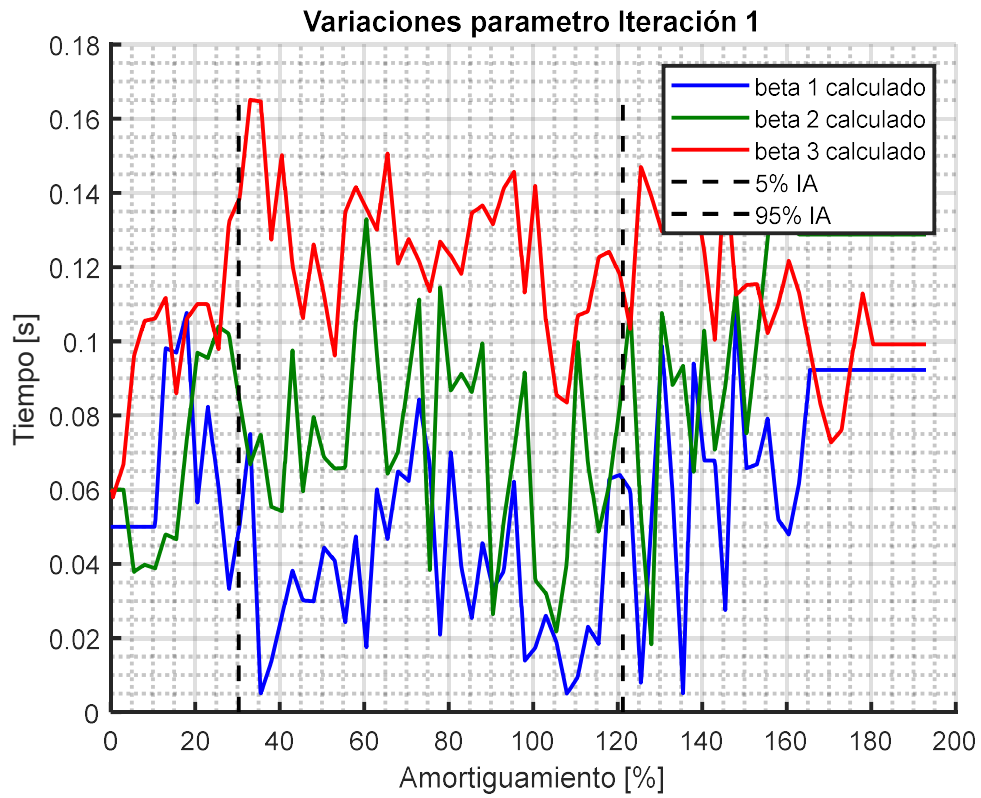


Figura 11-41: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (ICA50 FB)

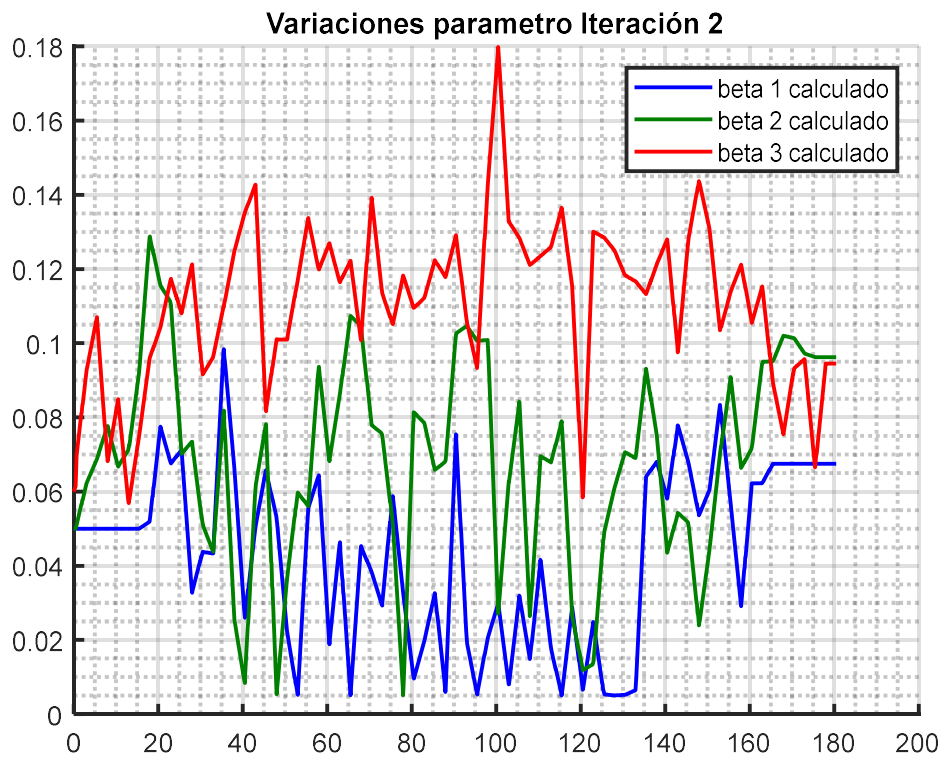


Figura 11-42: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (ICA100 FB)

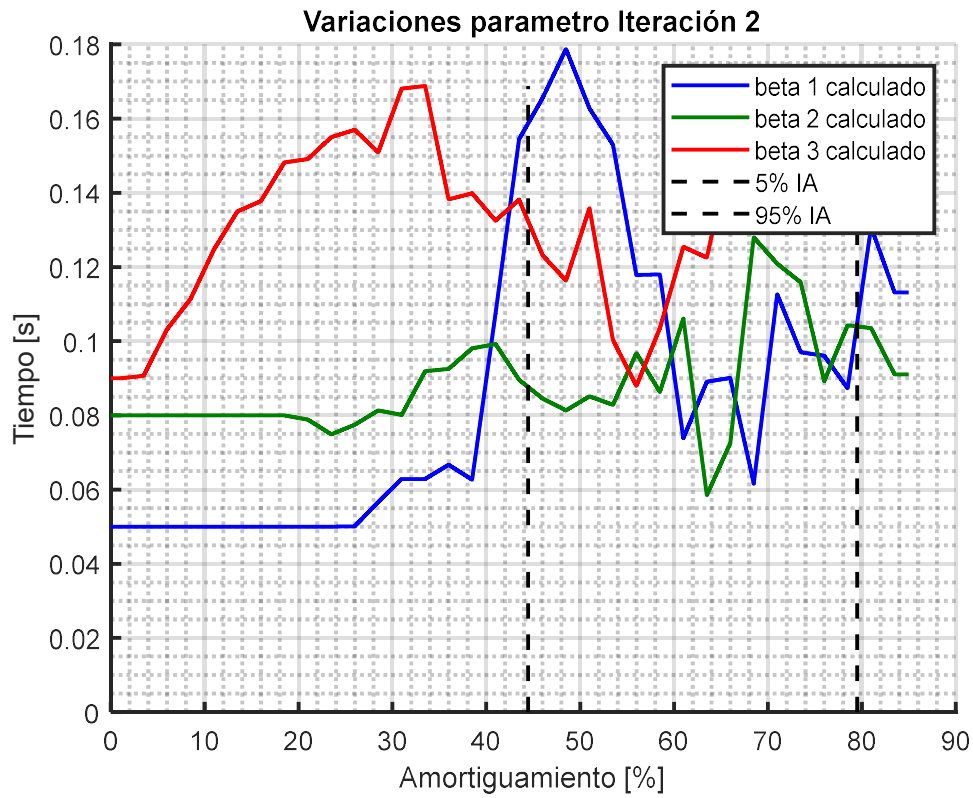


Figura 11-43: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (DEN100 FB)

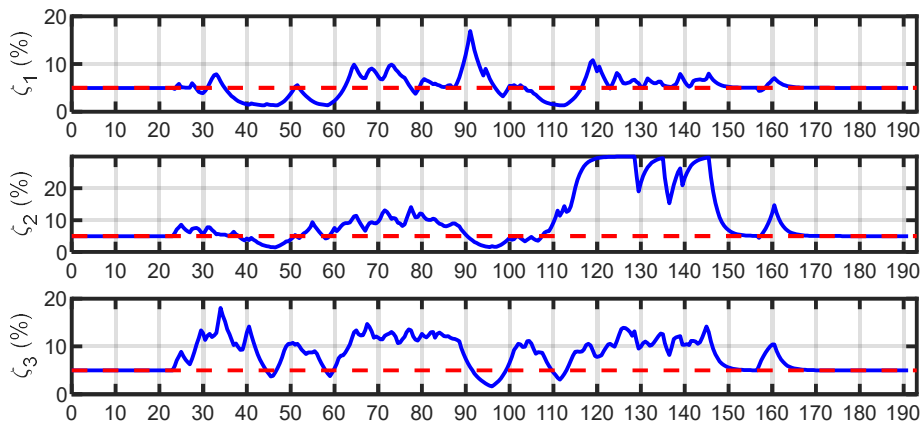


Figura 11-44: Amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (ICA50 FB)

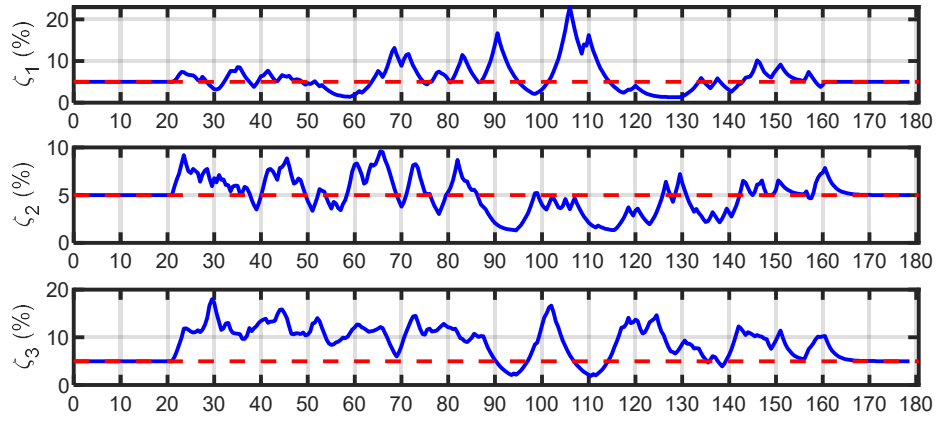


Figura 11-45: Amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (ICA100 FB)

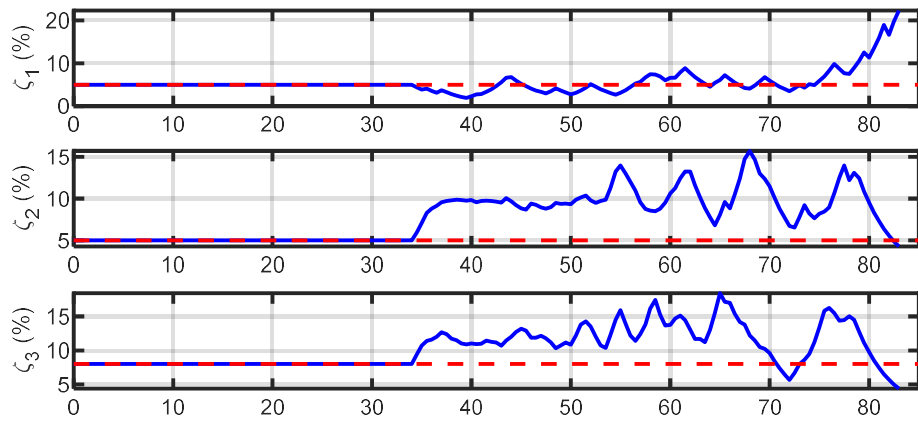


Figura 11-46: Amortiguamiento en el tiempo calculado con N-R (DEN100 FB)

11.13 Anexo: Amortiguamientos calculados caso base aislada (UKF Y N-R)

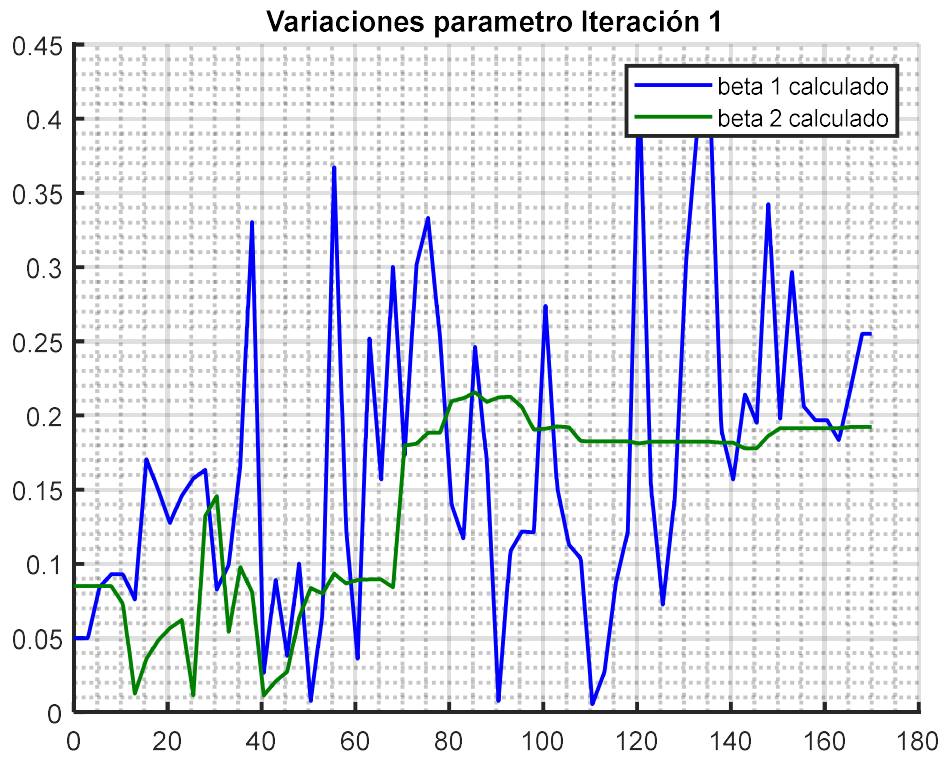


Figura 11-47: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (ICA100 BI)

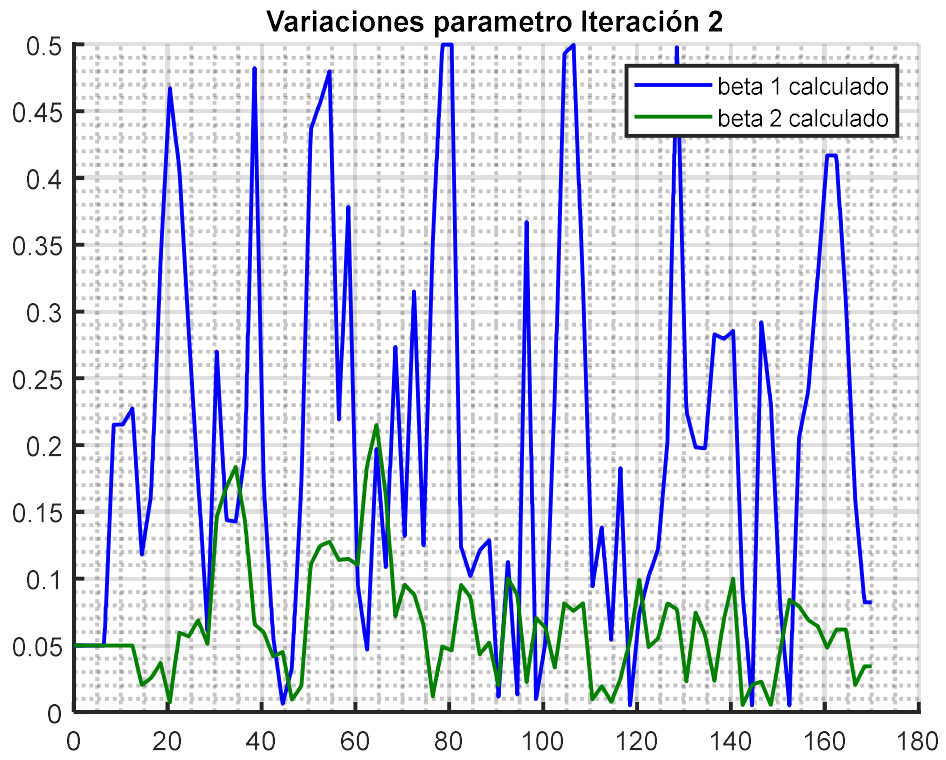


Figura 11-48: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (ICA140 BI)

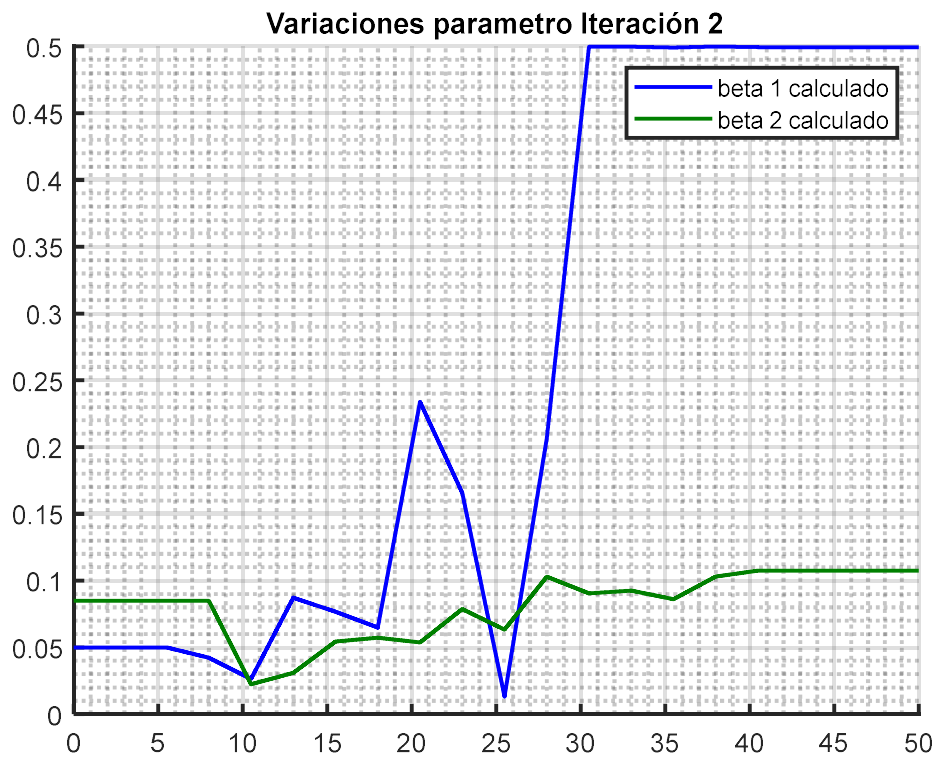


Figura 11-49: Amortiguamiento en el tiempo calculado con UKF (LAC100 BI)

11.14 Anexo: MAC caso base fija

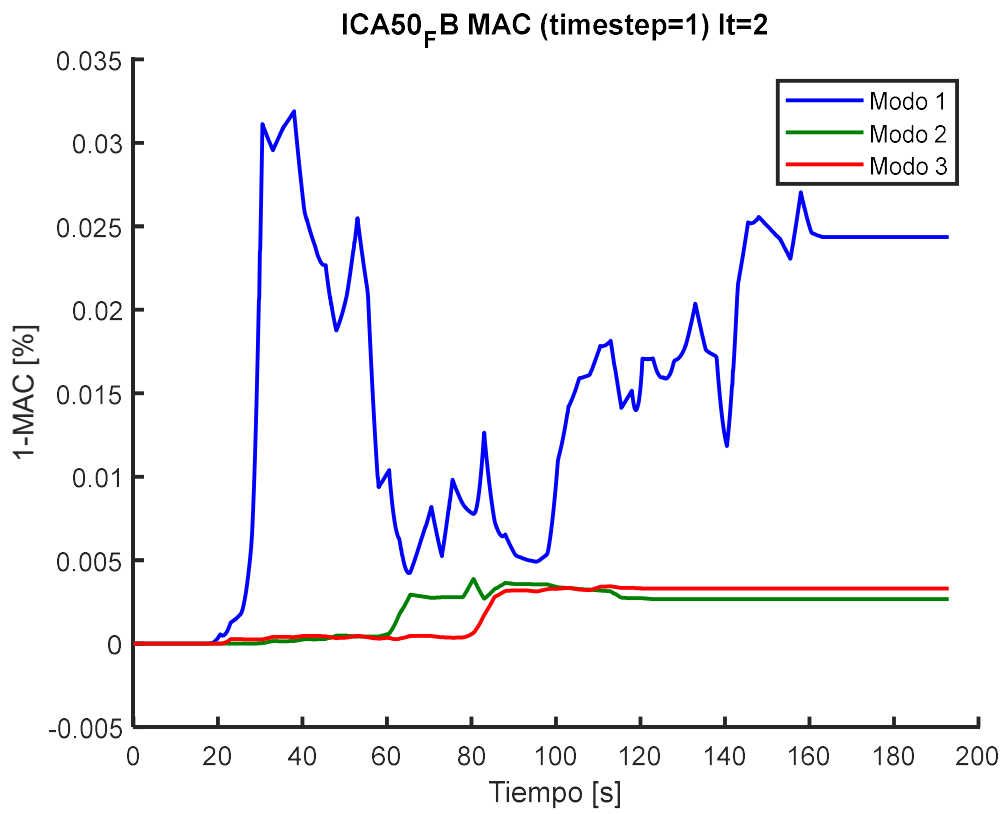


Figura 11-50: MAC en el tiempo ICA50 FB

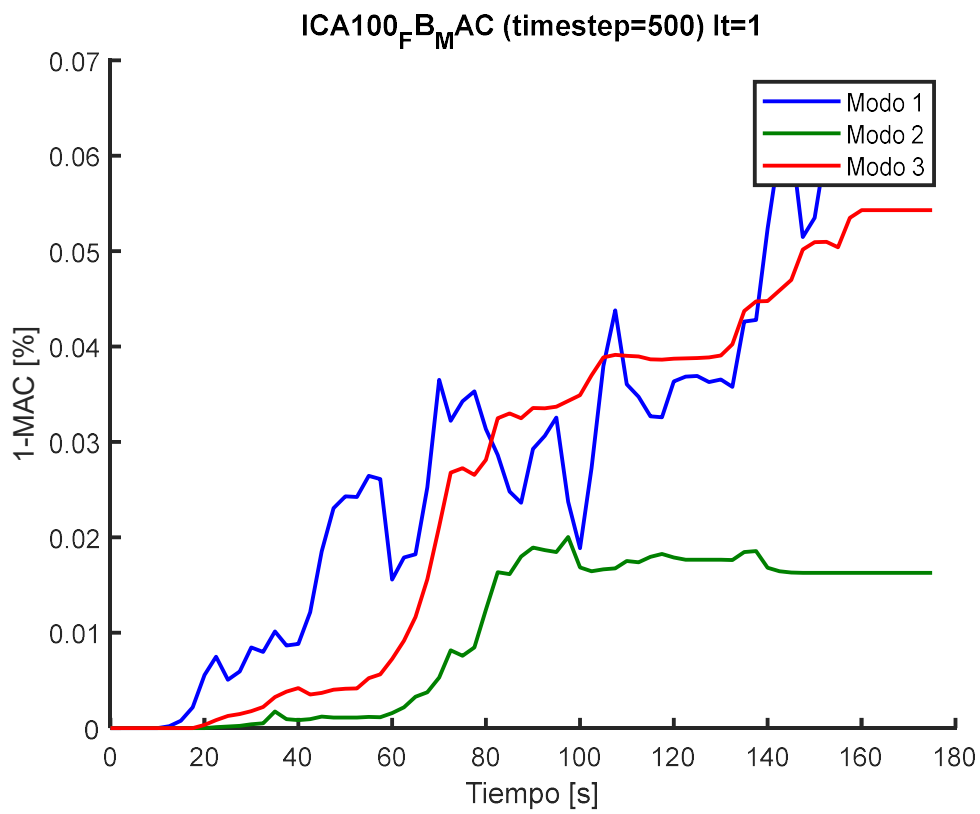


Figura 11-51: MAC en el tiempo ICA100 FB

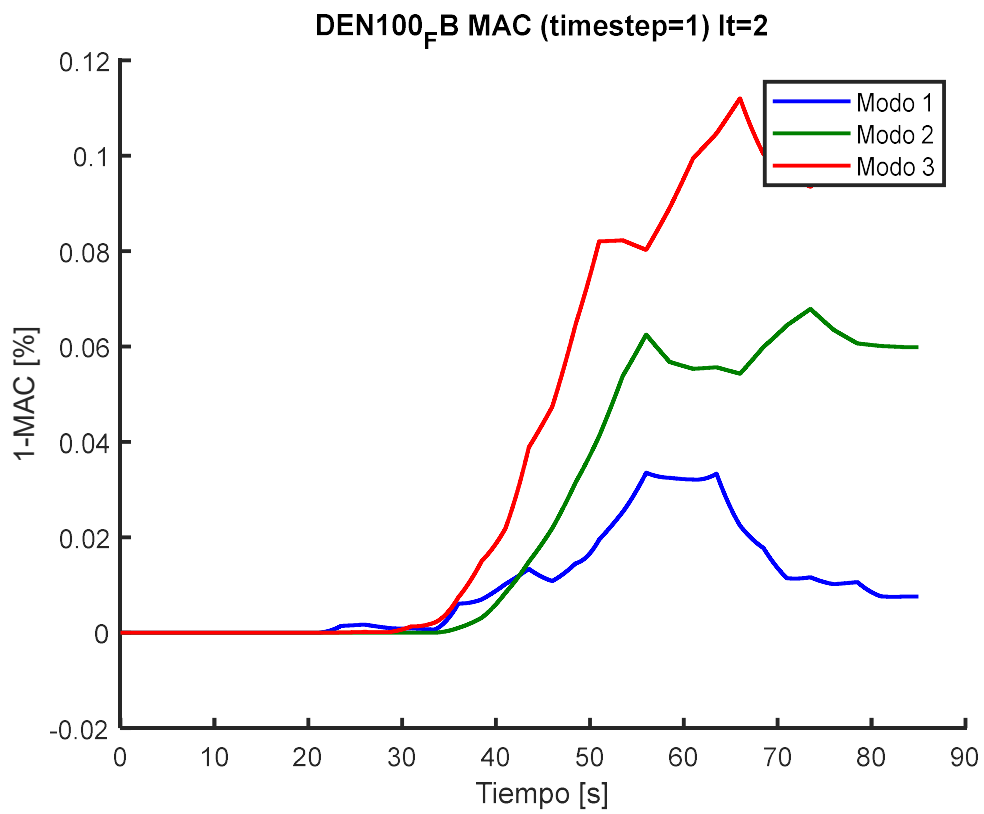
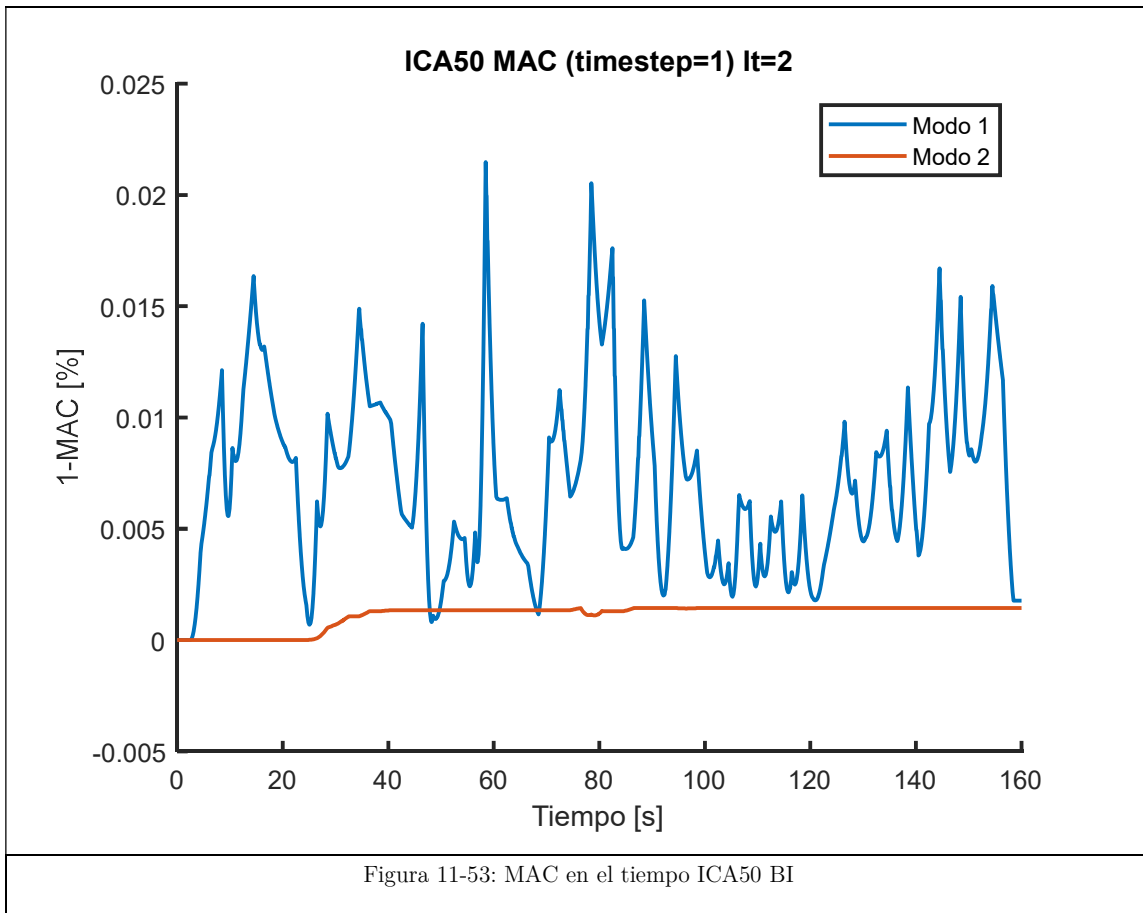


Figura 11-52: MAC en el tiempo DEN100 FB

11.15 Anexo: MAC caso base aislada



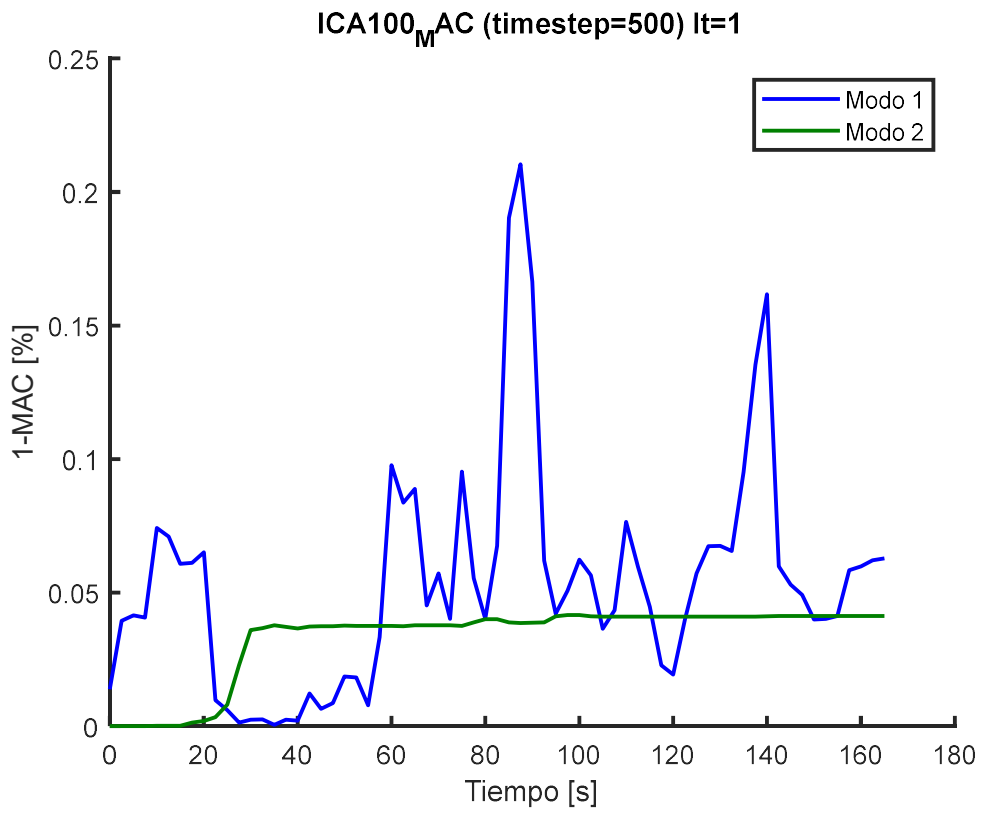


Figura 11-54: MAC en el tiempo ICA100 BI

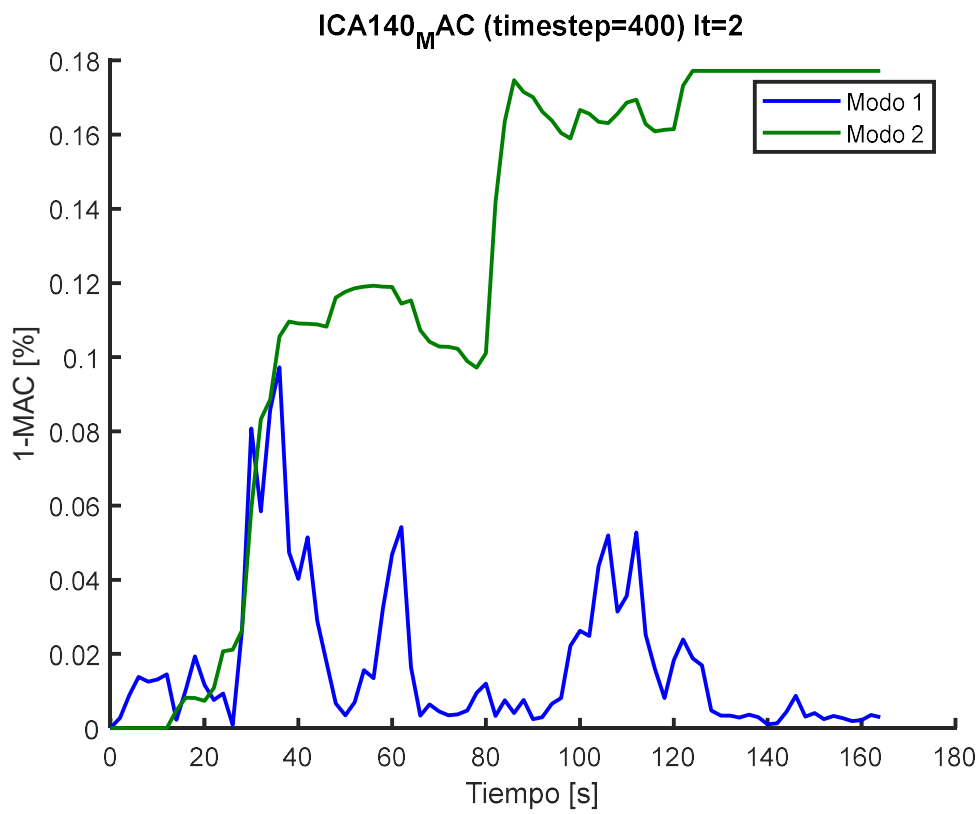


Figura 11-55: MAC en el tiempo ICA140 BI

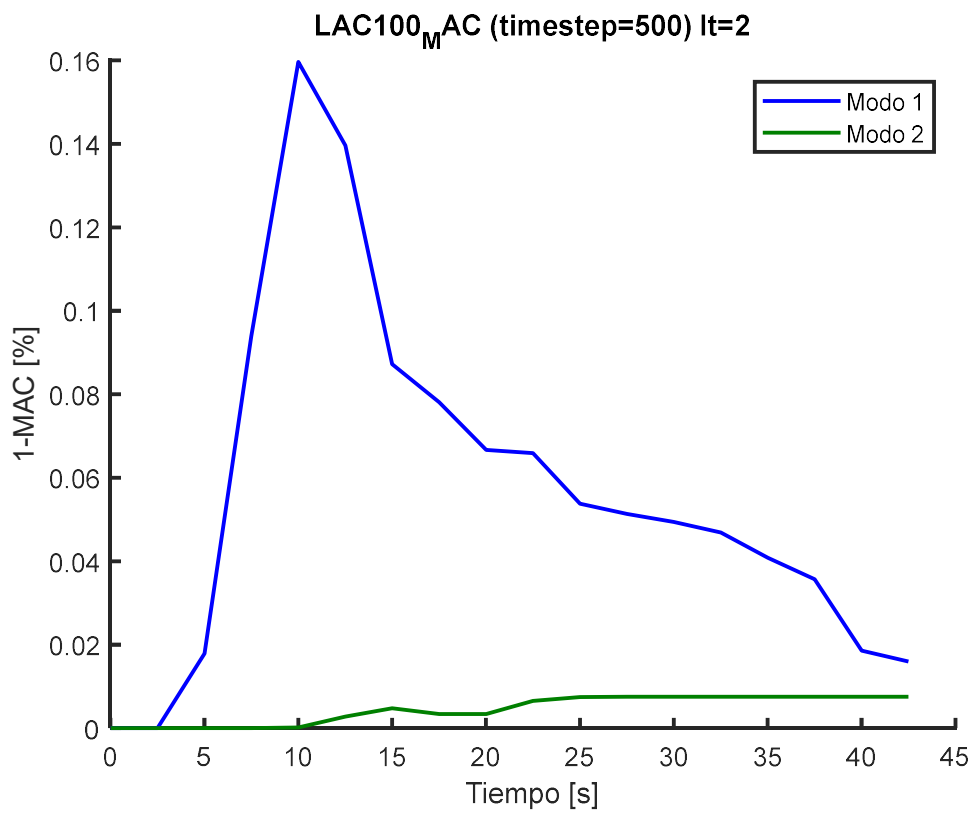


Figura 11-56: MAC en el tiempo LAC100 BI

11.16 Anexo: Respuesta y amortiguamientos Newton Raphson

11.16.1 Anexo: Respuesta

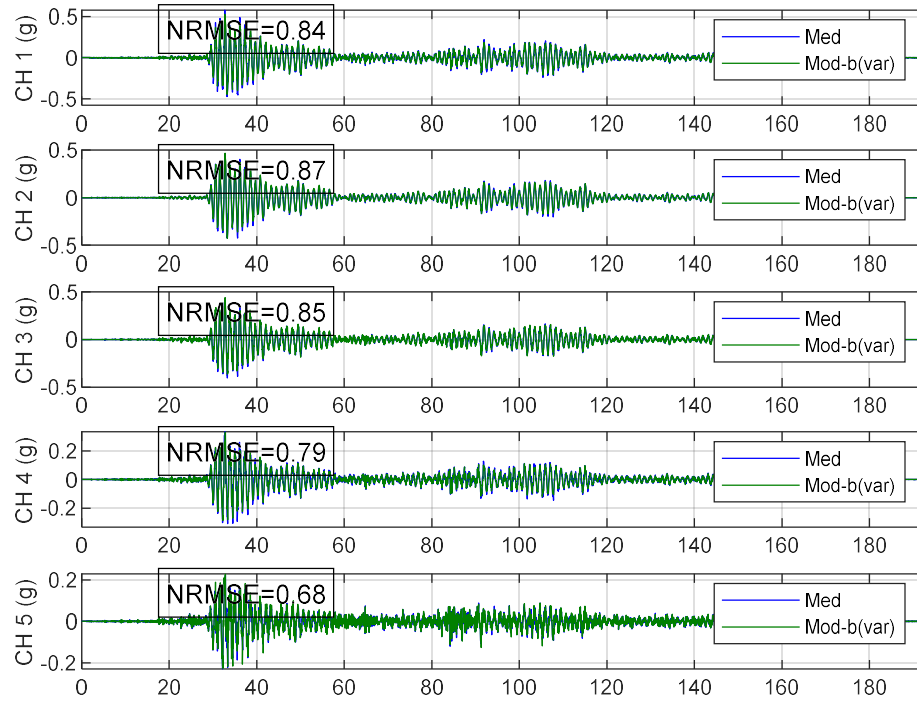


Figura 11-57: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (ICA50 FB)

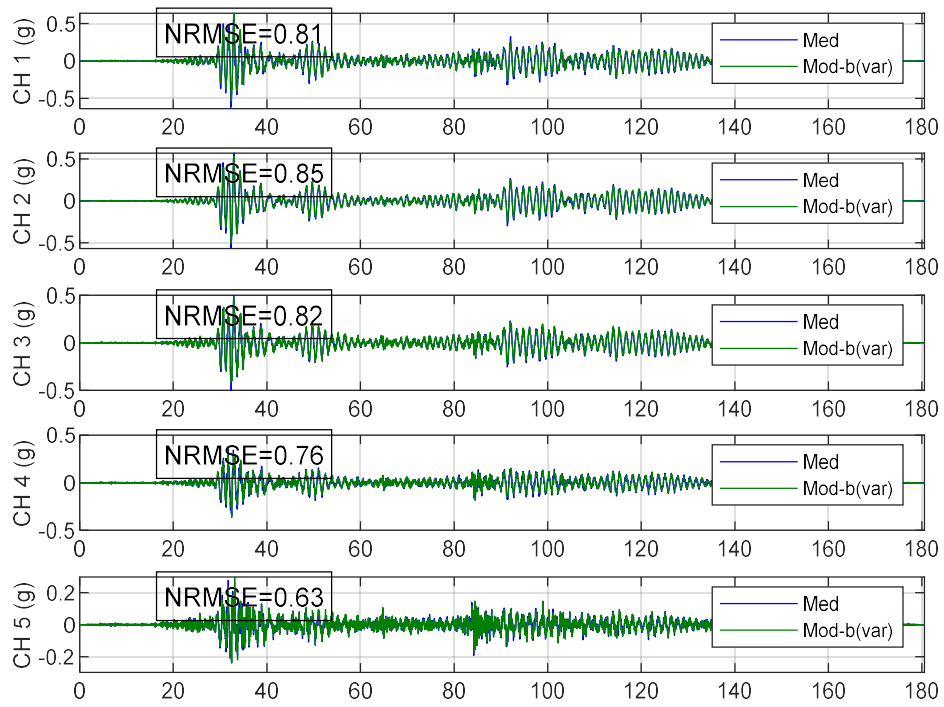


Figura 11-58: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (ICA100 FB)

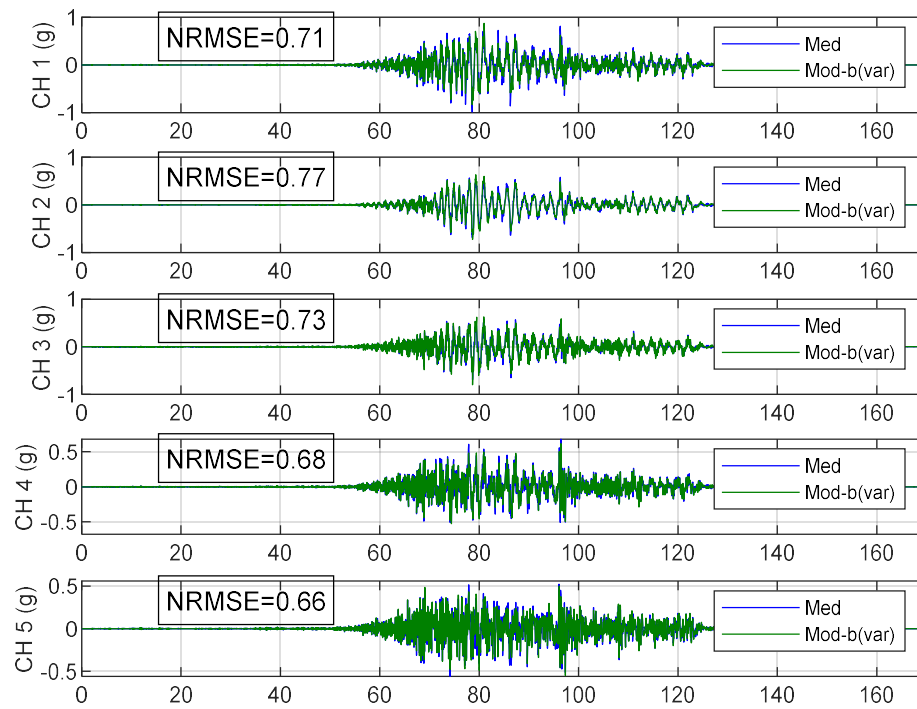


Figura 11-59: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (DEN67 FB)

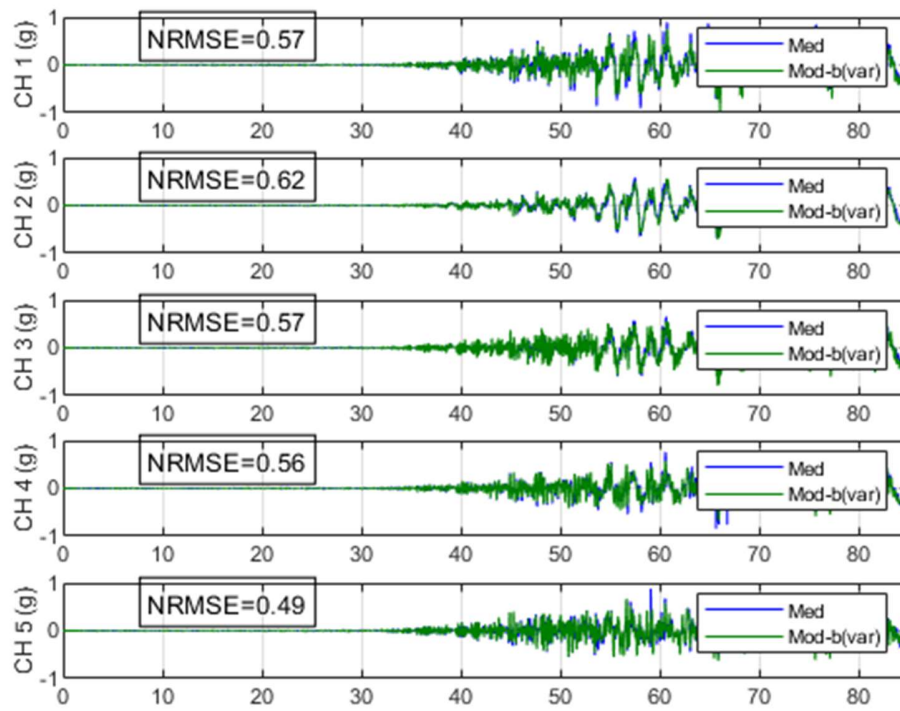


Figura 11-60: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (DEN100 FB)

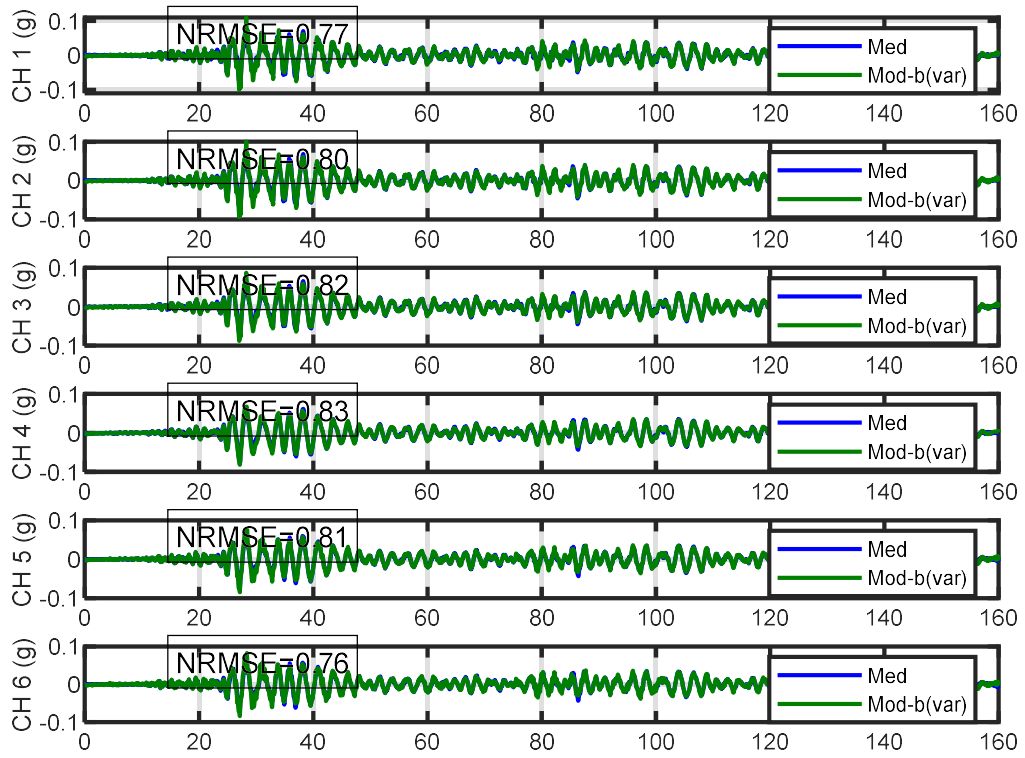


Figura 11-61: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (ICA50 BI)

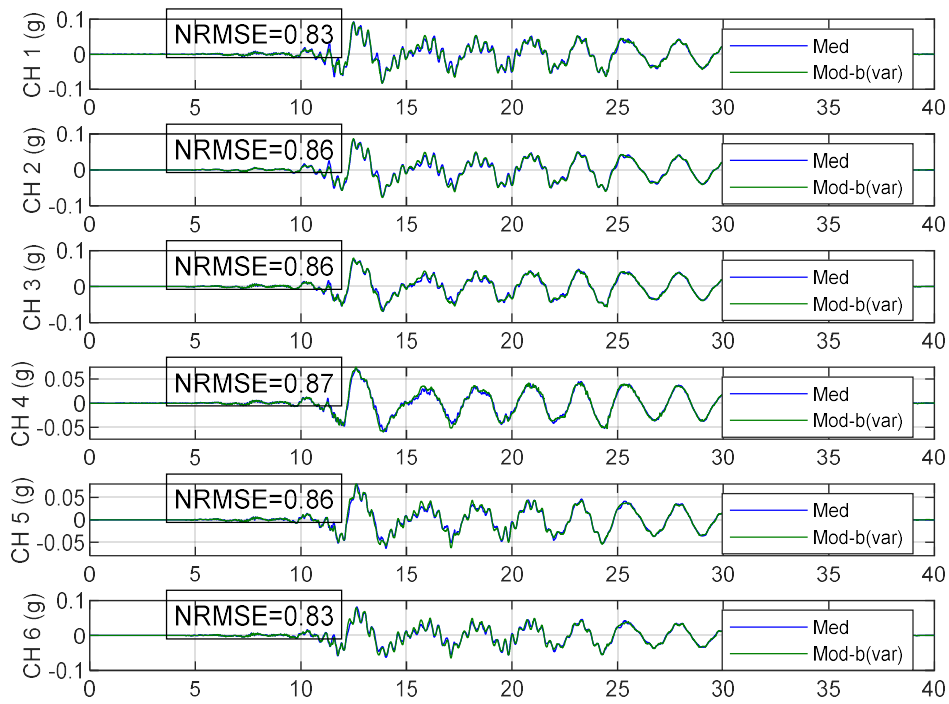


Figura 11-62: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (CNP100 BI)

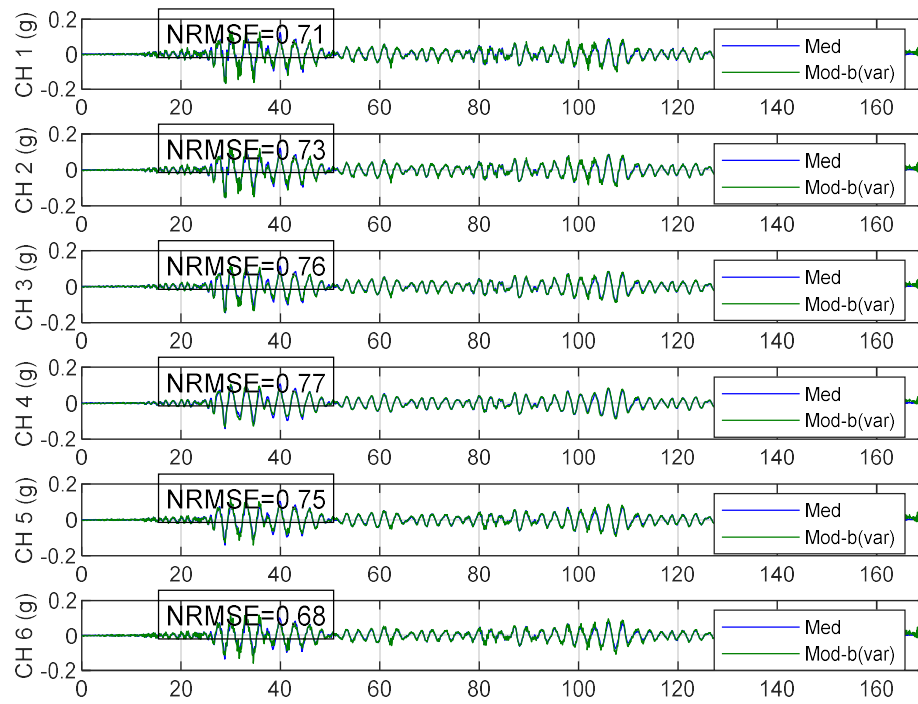


Figura 11-63: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (ICA100 BI)

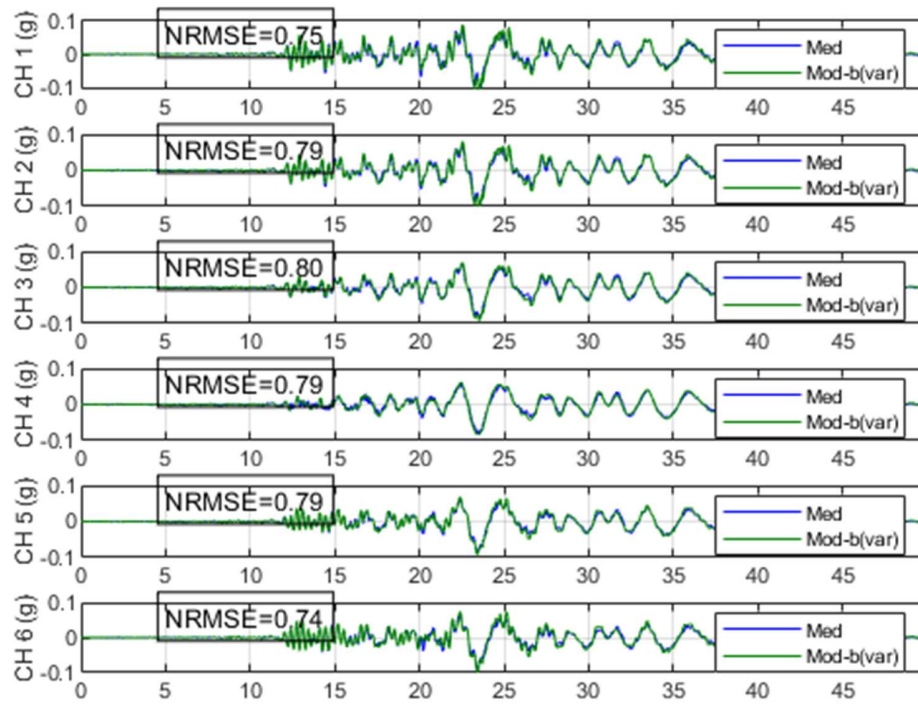


Figura 11-64: Respuesta calculada ajuste frecuencia y amortiguamiento N-R (LAC100 BI)

11.16.2 Anexo: Amortiguamiento

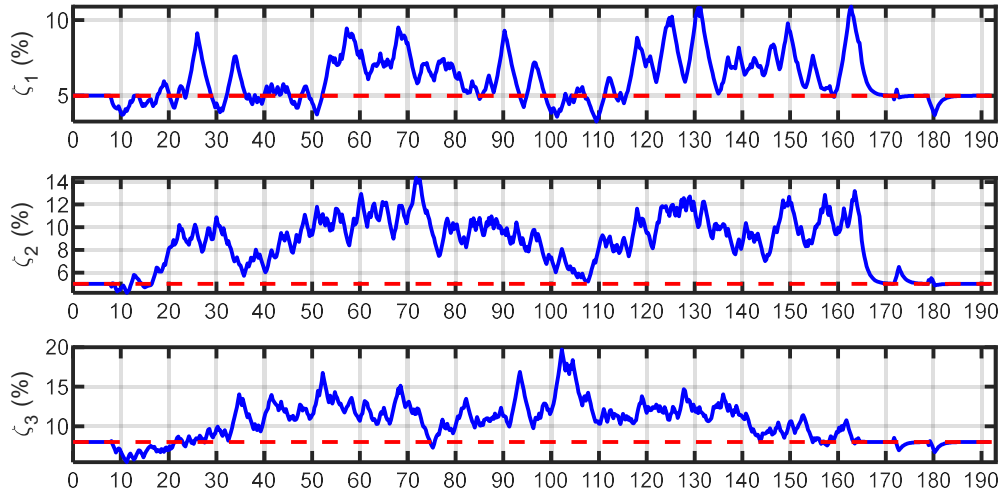


Figura 11-65: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (ICA50 FB)

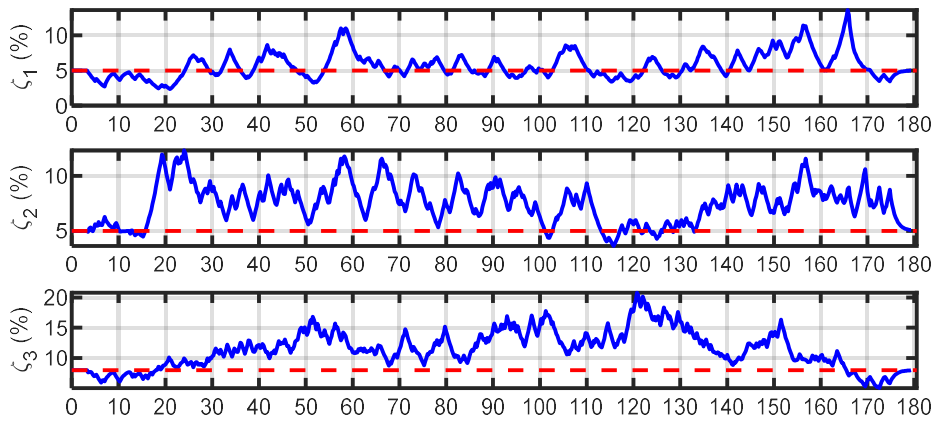


Figura 11-66: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (ICA100 FB)

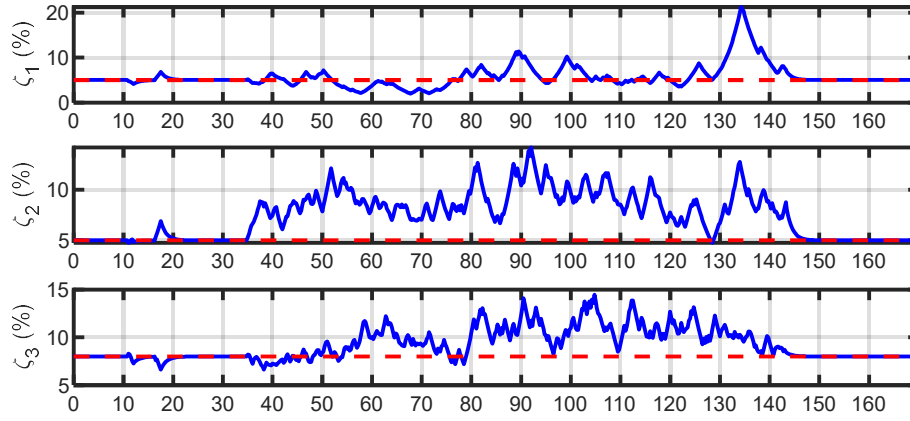


Figura 11-67: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (DEN67 FB)

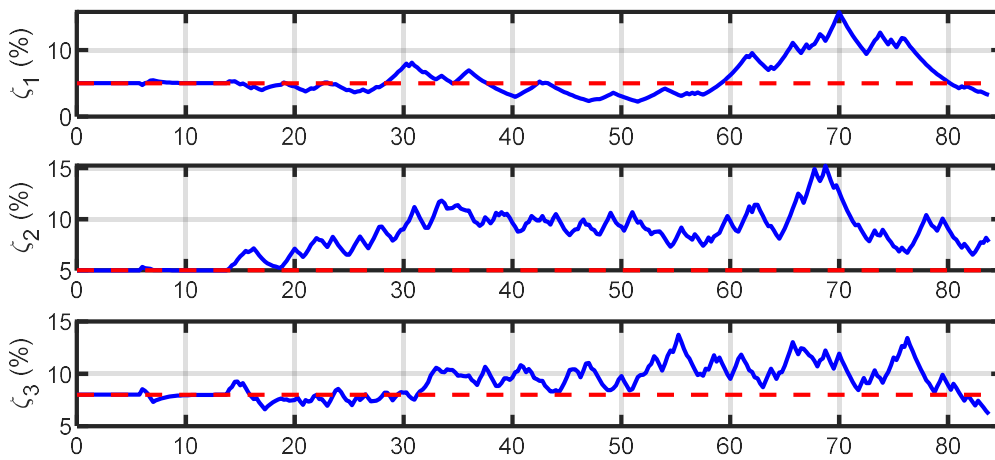


Figura 11-68: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (DEN100 FB)

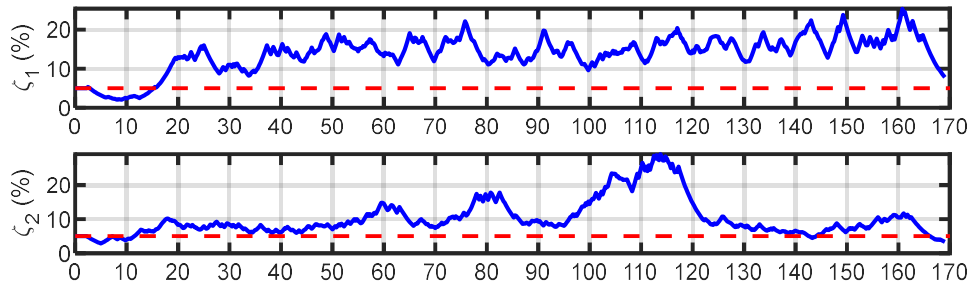


Figura 11-69: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (ICA100 BI)

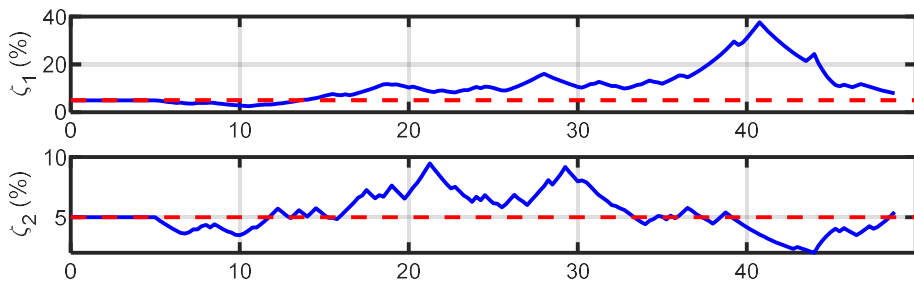


Figura 11-70: Respuesta calculada amortiguamiento con N-R, frecuencia con UKF (LAC100 BI)