

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Control semi-activo de estructuras
empleando un algoritmo genético tipo
NSGA-II combinado con lógica difusa
para administrar fuerzas de control en
amortiguadores magnetoreológicos
MR**

David Marcelo Bedoya Zambrano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2021

Control semi-activo de estructuras empleando un algoritmo genético tipo NSGA-II combinado con lógica difusa para administrar fuerzas de control en amortiguadores magnetoreológicos MR

David Marcelo Bedoya Zambrano

Trabajo de grado presentado para optar al título de:
Maestría en Ingeniería-Estructuras

Director:

Ph.D., Luis Augusto Lara Valencia

Codirector:

Ph.D., John Jairo Blandón Valencia

Línea de Investigación:

Dinámica de Estructuras-Control Estructural

Grupo de Investigación:

Centro de Proyectos e Investigaciones Sísmicas -CPIS

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia

2021

It is not knowledge, but the act of learning, not possession but the act of getting there, which grants the greatest enjoyment

Carl Friedrich Gauss

Agradecimientos

A Dios por ser mi guía en los momentos más difíciles de este camino.

A mis padres por el gran esfuerzo que han hecho para que yo pueda formarme como profesional.

A mis hermanos: Maria Fernanda y Estiven por su apoyo incondicional.

Un agradecimiento muy especial al profesor Luis Lara por su apoyo incondicional y quien ha tenido dedicación completa en el desarrollo de esta investigación.

Al profesor John Blandón por su acompañamiento y asesoría con la elaboración de este documento.

Finalmente, a la Universidad Nacional de Colombia por permitirme ser parte de esta institución de la cual me siento orgulloso de pertenecer.

Resumen

Título: Control semi-activo de estructuras empleando un algoritmo genético tipo NSGA-II combinado con lógica difusa para administrar fuerzas de control en amortiguadores magnetoreológicos MR

Esta tesis presenta una metodología para administrar fuerzas de control en amortiguadores magnetoreológicos (MR-Dampers). Se basa en la programación de un algoritmo genético de clasificación no dominada, (Non-Dominated Genetic Sorting Algorithm-NSGA-II) combinado con lógica difusa (Fuzzy Logic-FL). Se pretende mejorar la capacidad de respuesta de las estructuras cuando éstas se encuentran sometidas a la acción de cargas dinámicas. El NSGA-II ha sido ampliamente utilizado en problemas de optimización multi-objetivo, demostrando ser uno de los algoritmos más eficientes para controlar sistemas dinámicos complejos y altamente no lineales.

En este trabajo se desarrollan dos tipos de controladores: el primer controlador FLC-1, se basa en lógica difusa clásica y ha sido programado empleando 49 reglas de inferencia que se obtuvieron mediante un análisis empírico. El segundo controlador FLC-2, fue desarrollado con 20 reglas de inferencia gaussianas y sus parámetros fueron optimizados a través de un GA tipo NSGA-II, combinado con lógica difusa.

Los dos controladores se utilizaron en modelos numéricos de estructuras tipo pórtico plano y pórtico tridimensional, bajo la acción de distintas aceleraciones de suelo. Los parámetros de entrada que se emplearon fueron los desplazamientos y velocidades de las edificaciones, mientras que el único parámetro de salida fue el voltaje requerido para generar las fuerzas de control en el amortiguador MR. Los resultados obtenidos demuestran que estos dispositivos mejoran significativamente la función de respuesta de las estructuras. Sin embargo, el controlador FLC-2 presenta mejores índices de desempeño para las respuestas RMS de aceleraciones, RMS de desplazamientos y las derivas máximas de piso.

Palabras clave: Control estructural, Algoritmos genéticos, Lógica difusa, Amortiguadores magnetoreológicos.

Abstract

Title: Semi-active control structures using a NSGA-II genetic algorithm combined with fuzzy logic to provide control forces in magnetorheological (MR) dampers

This thesis presents a methodology to provide control forces using magnetorheological dampers (MR.) It is based on the programming of a Non-Dominated Genetic Sorting Algorithm (NSGA-II) combined with Fuzzy Logic (FL). The MR dampers improve the response capacity of the structures, when they are subjected to the action of dynamic loads. NSGA-II has been used extensively in multi-objective optimization problems, proving to be one of the most efficient algorithms to control complex and highly nonlinear dynamic systems.

In this research two types of controllers were developed: the first controller, called FLC-1 is based on classical fuzzy logic and was programmed using 49 inference rules obtained through an empirical analysis. The second controller, called FLC-2 was developed with 20 Gaussian inference rules. Its parameters were optimized using a GA type NSGA-II, combined with fuzzy logic.

The two controllers were used in numerical models of plane frame and 3D frame structures under the action of different ground accelerations. The input parameters used were the displacements and velocities of the buildings, while the only output parameter was the command voltage required to generate the control forces in the MR damper. The results obtained show that these mechanisms significantly improve the response function of the structures. However, the FLC-2 controller presents higher decreases in the RMS accelerations, RMS displacements and maximum floor drifts.

Keywords: Structural control, Genetic algorithms, Fuzzy logic, Magnetorheological dampers.

Contenido

Agradecimientos	IV
Resumen	V
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XVII
1. Capítulo 1	
Introducción	1
1.1. Generalidades del problema y justificación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Metodología	3
1.3.1. Definición de modelos numéricos	4
1.3.2. Definición del amortiguador MR	4
1.3.3. Desarrollo computacional	4
1.3.4. Evaluación de los sistemas de control desarrollados	4
1.3.5. Resumen del contenido	5
2. Capítulo 2	
Control Estructural	6
2.1. Generalidades	6
2.2. Sistemas de control semi-activo	7
2.2.1. Generalidades sobre los sistemas de control semi-activo	7
2.2.2. Definición genérica de un sistema de control semi-activo	8
2.3. Dispositivos de control semi-activo	9
2.3.1. Amortiguadores de orificio variable	10
2.3.2. Amortiguadores de fricción variable	10
2.3.3. Amortiguadores de fluido sintonizado semi-activos	11
2.3.4. Amortiguadores de fluido controlable	11

3. Capítulo 3**Teoría Sobre Amortiguadores Magnetoreológicos MR 15**

3.1. Generalidades	15
3.2. Fluidos Magnetoreológicos MR	16
3.3. Modelos de fluidos MR	18
3.4. Características básicas de amortiguadores MR	19
3.5. Modelos de amortiguadores Magnetoreológicos MR	21
3.5.1. Modelos no paramétricos	22
3.5.2. Modelos paramétricos	22

4. Capítulo 4**Sistema de Control Basado en Lógica Difusa Clásica FLC-1 28**

4.1. Generalidades	28
4.2. Teoría general de la lógica difusa	29
4.3. Consideraciones básicas de la lógica difusa	31
4.3.1. Conjuntos difusos	31
4.3.2. Geometría de la funciones de pertinencia	33
4.3.3. Fuzzificación	36
4.3.4. Toma de decisiones	36
4.3.5. Defuzzificación	36
4.4. Diseño del Controlador FLC-1 propuesto	38
4.4.1. Parámetros de entrada y salida del controlador FLC-1	38
4.4.2. Definición de las funciones de pertinencia	39
4.4.3. Estrategia de defuzzificación	41

5. Capítulo 5**Sistema de Control Basado en un GA Tipo NSGA-II Combinado Con Lógica Difusa 44**

5.1. Generalidades	44
5.2. Teoría general de los algoritmos genéticos	45
5.3. Estructura básica de un algoritmo genético	46
5.3.1. Operadores empleados en GA	48
5.3.2. Codificación	48
5.3.3. Selección	51
5.3.4. Combinación	53
5.3.5. Mutación	55
5.4. Algoritmos genéticos multi-objetivo	56
5.5. Algoritmo genético de clasificación no dominada NSGA-II	58
5.6. Diseño del controlador FLC-2 propuesto	61
5.6.1. Entorno difuso	62

5.6.2. Optimización del FLC-2 usando el NSGA-II	65
6. Capítulo 6	
Definición de los Casos de Estudio	69
6.1. Definición de las aceleraciones de suelo	69
6.2. Caracterización de los casos de estudio	72
6.2.1. Caso de estudio No. 1	73
6.2.2. Caso de estudio No. 2	76
6.3. Metodología de análisis estructural	80
6.3.1. Parámetros de rigidez, masa y amortiguamiento	80
6.4. Parámetros del amortiguador MR empleados	81
7. Capítulo 7	
Resultados de las modelaciones numéricas	83
7.1. Caso de estudio No. 1	83
7.1.1. Análisis para el sismo de Kobe	83
7.1.2. Desempeño general de los controladores FLC-1 y FLC-2	96
7.2. Caso estudio No. 2	109
7.2.1. Análisis para el sismo de Loma Prieta	109
7.2.2. Evaluación general de los controladores	122
8. Capítulo 8	
Conclusiones y recomendaciones	148
8.1. Conclusiones	148
8.2. Recomendaciones	151
A. Resultados de optimización obtenidos por el NSGA-II en el FLC-2	153
A.1. Caso de estudio No. 1	153
A.1.1. Sismo: El Centro	153
A.1.2. Sismo: Morgan Hill	156
A.1.3. Sismo: Loma Prieta	158
A.1.4. Sismo: Petrolia	161
A.1.5. Sismo: Northridge	163
A.1.6. Sismo: Nueva Zelanda	166
A.1.7. Sismo: Italia	168
A.2. Caso de estudio No. 2	171
A.2.1. Sismo: El Centro	171
A.2.2. Sismo: Morgan Hill	173
A.2.3. Sismo: Petrolia	176
A.2.4. Sismo: Northridge	178
A.2.5. Sismo: Kobe	181

A.2.6. Sismo: Nueva Zelanda	183
A.2.7. Sismo: Italia	186
Bibliografía	189

Lista de Figuras

2.1. Estrategia de control semi-activo. Modificado de [25]	8
2.2. Diagrama de bloques para un sistema de control semi-activo. Modificado de [26]	9
2.3. Diagrama de bloques para un sistema de control semi-activo: a). amortiguadores de orificio variable, b). amortiguadores de fricción variable, c). amortiguadores de fluido sintonizado y d). amortiguadores de fluido controlable. Modificado de [14]	10
2.4. Modelo de viscoplasticidad de Bingham para un fluido ER Modificado de [29]	13
2.5. Diagrama de histéresis sistema de control semi-activo. Modificado de [29] . .	13
3.1. Fluido MR: a). Sin campo magnético b). Con campo magnético. Modificado de [52]	17
3.2. Modelo viscoplástico de Bingham	19
3.3. Modos de operación para dispositivos que utilizan fluidos controlables: a). Válvula b). Cizallamiento directo c). Compresión. Modificado de [29]	20
3.4. Prototipo de amortiguador MR Modificado de [14]	21
3.5. Modelo de Bingham para amortiguadores MR Modificado de [29]	23
3.6. Modelo de Gamota y Filisko Modificado de [74]	24
3.7. Modelo de Bouc-Wen para amortiguadores MR Modificado de [74]	24
3.8. Modelo fenomenológico para amortiguadores MR Modificado de [74]	25
4.1. Configuración básica de un controlador de lógica difusa FLC Modificado de [89]	30
4.2. Función de pertinencia de la temperatura Fuente: Autor	32
4.3. Función de pertinencia triangular Modificado de [94]	34
4.4. Función de pertinencia trapezoidal Modificado de [94]	34
4.5. Función de pertinencia tipo <i>S</i> Modificado de [94]	35
4.6. Función de pertinencia tipo gaussiana Modificado de [94]	36
4.7. Diagrama de flujo para el sistema de control propuesto (FLC-1) Modificado de [29]	38
4.8. Funciones de pertinencia para el desplazamiento y velocidad-FLC-1 Fuente: Autor	40
4.9. Funciones de pertinencia para el voltaje-FLC-1 Fuente: Autor	40
5.1. Clasificación de los algoritmos metaheurísticos Modificado de [108]	45

5.2.	Diagrama de flujo de un GA clásico Modificado de [120]	47
5.3.	Operadores difusos empleados en GA Modificado de [108]	48
5.4.	Ilegitimidad e inviabilidad en GA Modificado de [90]	49
5.5.	Propiedad de no redundancia en GA Modificado de [90]	49
5.6.	Combinación de un sólo punto Modificado de [108]	53
5.7.	Combinación de k puntos Modificado de [108]	54
5.8.	Combinación uniforme Modificado de [108]	54
5.9.	Combinación parcial Modificado de [108]	55
5.10.	Mutación de un sólo punto Modificado de [130]	56
5.11.	Diagrama de flujo NSGA-II Modificado de [8]	60
5.12.	Enfoque del NSGA-II para la generación de nuevas poblaciones Modificado de [10]	61
5.13.	Diagrama de flujo para el controlador FLC-2 Modificado de [8]	62
5.14.	Enfoque de interpretación para una regla difusa Modificado de [8]	63
5.15.	Ejemplo de operación de un FLC genérico Modificado de [8]	65
5.16.	Estructura de codificación de un cromosoma para el controlador FLC-2 Modificado de [8]	67
5.17.	Conjunto de frentes de Pareto Fuente: Autor	68
6.1.	Registros de aceleraciones en el dominio del tiempo Fuente: Autor	70
6.2.	Espectros de aceleraciones en el dominio de la frecuencia -FFT Fuente: Autor	71
6.3.	Espectros de respuestas de aceleraciones Fuente: Autor	72
6.4.	Configuración arquitectónica de la estructura Modificado de [142]	73
6.5.	Formas modales del pórtico plano empleado en el caso de estudio No.1 Fuente: Autor	74
6.6.	Propiedades mecánicas: caso de estudio No. 1 Fuente: Autor	75
6.7.	Configuración arquitectónica de la estructura Fuente: Autor	76
6.8.	Formas modales del pórtico tridimensional empleado en el caso de estudio No.2 Fuente: Autor	77
6.9.	Configuración estructural para el caso de estudio No. 2 Fuente: Autor	78
6.10.	Propiedades mecánicas para el caso de estudio No. 2 Fuente: Autor	79
7.1.	Funciones de pertinencia para el desplazamiento-FLC-2 Fuente: Autor	85
7.2.	Funciones de pertinencia para la velocidad-FLC-2 Fuente: Autor	85
7.3.	Funciones de pertinencia para el voltaje-FLC-2: Fuente: Autor	86
7.4.	Sistema de inferencia para el controlador FLC-1 Fuente: Autor	87
7.5.	Sistema de inferencia para el controlador FLC-2 Fuente: Autor	87
7.6.	Superficie difusa para el controlador FLC-1 Fuente: Autor	88
7.7.	Superficie difusa para el controlador FLC-2 Fuente: Autor	88
7.8.	Evolución de los individuos del NSGA-II para el sismo de Kobe Fuente: Autor	90

7.9. Evolución en la generación 100 del NSGA-II para el sismo de Kobe Fuente: Autor	91
7.10. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Kobe Fuente: Autor . .	92
7.11. Curva de histéresis para el ciclo de velocidad en el amortiguador MR Fuente: Autor	93
7.12. Curva de histéresis para el ciclo de desplazamiento en el amortiguador MR Fuente: Autor	93
7.13. Función de voltaje para los amortiguadores MR Fuente: Autor	94
7.14. Respuestas RMS-Kobe: a). Desplazamiento b). Aceleración Fuente: Autor . .	95
7.15. Derivas máximas de piso-Kobe Fuente: Autor	95
7.16. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-El Centro Fuente: Autor	98
7.17. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Morgan Hill Fuente: Autor	98
7.18. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Loma Prieta Fuente: Autor	99
7.19. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Petrolia Fuente: Autor	99
7.20. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Northridge Fuente: Autor	100
7.21. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Nueva Zelanda Fuente: Autor	100
7.22. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Italia Fuente: Autor . .	101
7.23. Respuestas RMS para El Centro: a). Desplazamiento b). Aceleración Fuente: Autor	102
7.24. Respuestas RMS para Morgan Hill: a). Desplazamiento b). Aceleración Fuen- te: Autor	102
7.25. Respuestas RMS para Loma Prieta: a). Desplazamiento b). Aceleración Fuen- te: Autor	103
7.26. Respuestas RMS para Petrolia: a). Desplazamiento b). Aceleración Fuente: Autor	103
7.27. Respuestas RMS para Northridge: a). Desplazamiento b). Aceleración Fuente: Autor	104
7.28. Respuestas RMS para Nueva Zelanda: a). Desplazamiento b). Aceleración Fuente: Autor	104
7.29. Respuestas RMS para Italia: a). Desplazamiento b). Aceleración Fuente: Autor	105
7.30. Derivas máximas de piso para El Centro Fuente: Autor	105
7.31. Derivas máximas de piso para Morgan Hill Fuente: Autor	106
7.32. Derivas máximas de piso para Loma Prieta Fuente: Autor	106
7.33. Derivas máximas de piso para Petrolia Fuente: Autor	107
7.34. Derivas máximas de piso para Northridge Fuente: Autor	107
7.35. Derivas máximas de piso para Nueva Zelanda Fuente: Autor	108
7.36. Derivas máximas de piso para Italia Fuente: Autor	108
7.37. Funciones de pertinencia para el desplazamiento-FLC-2 Fuente: Autor	111

7.38. Funciones de pertinencia para la velocidad-FLC-2 Fuente: Autor	111
7.39. Funciones de pertinencia para el voltaje-FLC-2 Fuente: Autor	112
7.40. Sistema de inferencia para el controlador FLC-2 Fuente: Autor	112
7.41. Superficie difusa para el controlador FLC-2 Fuente: Autor	113
7.42. Evolución de los individuos del NSGA-II Fuente: Autor	114
7.43. Evolución de los individuos del NSGA-II para la Generación 100 Fuente: Autor	115
7.44. Desplazamiento piso 11_x para el sismo de Loma Prieta Fuente: Autor	116
7.45. Desplazamiento piso 11_y para el sismo de Loma Prieta Fuente: Autor	116
7.46. Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Loma Prieta Fuente: Autor	117
7.47. Curvas de histéresis para el ciclo de desplazamiento: a). Dirección X b). Di- rección Y Fuente: Autor	118
7.48. Curvas de histéresis para el ciclo de velocidad: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	119
7.49. Función de voltaje para los amortiguadores MR Fuente: Autor	120
7.50. RMS de desplazamientos para Loma Prieta: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	121
7.51. RMS de aceleraciones para Loma Prieta: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	121
7.52. Derivas máximas de piso para Loma Prieta: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	122
7.53. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -El Centro Fuente: Autor	126
7.54. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -El Centro Fuente: Autor	126
7.55. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Morgan Hill Fuente: Autor	127
7.56. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Morgan Hill Fuente: Autor	127
7.57. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Petrolia Fuente: Autor	128
7.58. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Petrolia Fuente: Autor	128
7.59. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Northridge Fuente: Autor	129
7.60. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Northridge Fuente: Autor	129
7.61. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Kobe Fuente: Autor .	130
7.62. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Kobe Fuente: Autor .	130
7.63. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Nueva Zelanda Fuente: Autor	131
7.64. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Nueva Zelanda Fuente: Autor	131
7.65. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Italia Fuente: Autor .	132
7.66. Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Italia Fuente: Autor .	132

7.67. RMS de desplazamientos-El Centro: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	133
7.68. RMS de aceleraciones-El Centro: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	133
7.69. RMS de desplazamientos-Morgan Hill: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	134
7.70. RMS de aceleraciones-Morgan Hill: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	134
7.71. RMS de desplazamientos-Petrolia: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	135
7.72. RMS de aceleraciones-Petrolia: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	135
7.73. RMS de desplazamientos-Northridge: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	136
7.74. RMS de aceleraciones-Northridge: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	136
7.75. RMS de desplazamientos-Kobe: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	137
7.76. RMS de aceleraciones-Kobe: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor .	137
7.77. RMS de desplazamientos-Nueva Zelanda: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	138
7.78. RMS de aceleraciones-Nueva Zelanda: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	138
7.79. RMS de desplazamientos-Italia: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	139
7.80. RMS de aceleraciones-Italia: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor .	139
7.81. Derivas máximas de piso-El Centro: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	140
7.82. Derivas máximas de piso-Morgan Hill: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	140
7.83. Derivas máximas de piso-Petrolia: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	141
7.84. Derivas máximas de piso-Northridge: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	141
7.85. Derivas máximas de piso-Kobe: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	142
7.86. Derivas máximas de piso-Nueva Zelanda: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	142
7.87. Derivas máximas de piso-Italia: a). Dirección X b). Dirección Y Fuente: Autor	143
7.88. Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-El Centro Fuente: Autor	144
7.89. Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Morgan Hill Fuente: Autor	144
7.90. Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Petrolia Fuente: Autor	145
7.91. Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Northridge Fuente: Autor	145

7.92. Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Kobe Fuente: Autor	146
7.93. Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Nueva Zelanda Fuente: Autor	146
7.94. Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Italia Fuente: Autor	147
A.1. Funciones de pertinencia para el desplazamiento-El Centro Fuente: Autor . .	153
A.2. Funciones de pertinencia para la velocidad-El Centro Fuente: Autor	154
A.3. Funciones de pertinencia para el voltaje-El Centro Fuente: Autor	154
A.4. Sistema de inferencia para el controlador-El Centro Fuente: Autor	155
A.5. Superficie difusa para el controlador-El Centro Fuente: Autor	155
A.6. Funciones de pertinencia para el desplazamiento-M. Hill Fuente: Autor . . .	156
A.7. Funciones de pertinencia para la velocidad-M. Hill Fuente: Autor	156
A.8. Funciones de pertinencia para el voltaje-M. Hill Fuente: Autor	157
A.9. Sistema de inferencia para el controlador-M. Hill Fuente: Autor	157
A.10. Superficie difusa para el controlador-M. Hill Fuente: Autor	158
A.11. Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Loma Prieta Fuente: Autor	158
A.12. Funciones de pertinencia para la velocidad-Loma Prieta Fuente: Autor . . .	159
A.13. Funciones de pertinencia para el voltaje-Loma Prieta Fuente: Autor	159
A.14. Sistema de inferencia para el controlador-Loma Prieta Fuente: Autor	160
A.15. Superficie difusa para el controlador-Loma Prieta Fuente: Autor	160
A.16. Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Petrolia Fuente: Autor . . .	161
A.17. Funciones de pertinencia para la velocidad-Petrolia Fuente: Autor	161
A.18. Funciones de pertinencia para el voltaje-Petrolia Fuente: Autor	162
A.19. Sistema de inferencia para el controlador-Petrolia Fuente: Autor	162
A.20. Superficie difusa para el controlador-Petrolia Fuente: Autor	163
A.21. Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Northridge Fuente: Autor .	163
A.22. Funciones de pertinencia para la velocidad-Northridge Fuente: Autor	164
A.23. Funciones de pertinencia para el voltaje-Northridge Fuente: Autor	164
A.24. Sistema de inferencia para el controlador-Northridge Fuente: Autor	165
A.25. Superficie difusa para el controlador-Northridge Fuente: Autor	165
A.26. Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Nueva Zelanda Fuente: Autor	166
A.27. Funciones de pertinencia para la velocidad-Nueva Zelanda Fuente: Autor . .	166
A.28. Funciones de pertinencia para el voltaje-Nueva Zelanda Fuente: Autor	167
A.29. Sistema de inferencia para el controlador-Nueva Zelanda Fuente: Autor . . .	167
A.30. Superficie difusa para el controlador-Nueva Zelanda Fuente: Autor	168
A.31. Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Italia Fuente: Autor	168
A.32. Funciones de pertinencia para la velocidad-Italia Fuente: Autor	169
A.33. Funciones de pertinencia para el voltaje-Italia Fuente: Autor	169

A.34.Sistema de inferencia para el controlador-Italia Fuente: Autor	170
A.35.Superficie difusa para el controlador-Italia Fuente: Autor	170
A.36.Funciones de pertinencia para el desplazamiento-El Centro Fuente: Autor . .	171
A.37.Funciones de pertinencia para la velocidad-El Centro Fuente: Autor	171
A.38.Funciones de pertinencia para el voltaje-El Centro Fuente: Autor	172
A.39.Sistema de inferencia para el controlador-El Centro Fuente: Autor	172
A.40.Superficie difusa para el controlador-El Centro Fuente: Autor	173
A.41.Funciones de pertinencia para el desplazamiento-M. Hill Fuente: Autor . . .	173
A.42.Funciones de pertinencia para la velocidad-M. Hill Fuente: Autor	174
A.43.Funciones de pertinencia para el voltaje-M. Hill Fuente: Autor	174
A.44.Sistema de inferencia para el controlador-M. Hill Fuente: Autor	175
A.45.Superficie difusa para el controlador-M. Hill Fuente: Autor	175
A.46.Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Petrolia Fuente: Autor . . .	176
A.47.Funciones de pertinencia para la velocidad-Petrolia Fuente: Autor	176
A.48.Funciones de pertinencia para el voltaje-Petrolia Fuente: Autor	177
A.49.Sistema de inferencia para el controlador-Petrolia Fuente: Autor	177
A.50.Superficie difusa para el controlador-Petrolia Fuente: Autor	178
A.51.Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Northridge Fuente: Autor .	178
A.52.Funciones de pertinencia para la velocidad-Northridge Fuente: Autor	179
A.53.Funciones de pertinencia para el voltaje-Northridge Fuente: Autor	179
A.54.Sistema de inferencia para el controlador-Northridge Fuente: Autor	180
A.55.Superficie difusa para el controlador-Northridge Fuente: Autor	180
A.56.Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Kobe Fuente: Autor	181
A.57.Funciones de pertinencia para la velocidad-Kobe Fuente: Autor	181
A.58.Funciones de pertinencia para el voltaje-Kobe Fuente: Autor	182
A.59.Sistema de inferencia para el controlador-Kobe Fuente: Autor	182
A.60.Superficie difusa para el controlador-Kobe Fuente: Autor	183
A.61.Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Nueva Zelanda Fuente: Autor	183
A.62.Funciones de pertinencia para la velocidad-Nueva Zelanda Fuente: Autor . .	184
A.63.Funciones de pertinencia para el voltaje-Nueva Zelanda Fuente: Autor	184
A.64.Sistema de inferencia para el controlador-Nueva Zelanda Fuente: Autor . . .	185
A.65.Superficie difusa para el controlador-Nueva Zelanda Fuente: Autor	185
A.66.Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Italia Fuente: Autor	186
A.67.Funciones de pertinencia para la velocidad-Italia Fuente: Autor	186
A.68.Funciones de pertinencia para el voltaje-Italia Fuente: Autor	187
A.69.Sistema de inferencia para el controlador-Italia Fuente: Autor	187
A.70.Superficie difusa para el controlador-Italia Fuente: Autor	188

Lista de Tablas

2.1. Propiedades físicas de fluidos ER Modificado de [29]	14
3.1. Propiedades de fluidos MR típicos Modificado de [55]	18
3.2. Modelos reológicos para fluidos MR con esfuerzo de fluencia Modificado de [57]	19
4.1. Sistema de inferencia para el controlador FLC-1 Modificado de [98]	41
5.1. Funciones objetivo del NSGA-II Fuente: Autor	66
6.1. Registros de aceleraciones de sismo Fuente: Autor	69
6.2. Análisis modal: pórtico plano Fuente: Propia	74
6.3. Análisis modal: pórtico tridimensional Fuente: Autor	77
6.4. Parámetros del amortiguador MR Fuente: Modificado de:[100]	81
7.1. Resultados generados por el NSGA-II para el sismo de Kobe Fuente: Autor .	84
7.2. Parámetros optimizados del individuo P_1 para el FLC-2 Fuente: Autor . . .	89
7.3. Comparación: respuestas máximas RMS de desplazamientos Fuente: Autor .	96
7.4. Comparación:respuestas máximas RMS de aceleraciones Fuente: Autor . . .	96
7.5. Derivas máximas de piso y porcentajes de reducción Fuente: Autor	97
7.6. Criterios de desempeño para el controlador FLC-2 Fuente: Autor	97
7.7. Resultados generados por el NSGA-II para el sismo de Loma Prieta Fuente: Autor	109
7.8. Parámetros optimizados por el individuo P_1 para el FLC-2 Fuente: Autor . .	110
7.9. Respuestas RMS máximas de desplazamientos-Dirección X Fuente: Autor . .	123
7.10. Respuestas RMS máximas de desplazamientos-Dirección Y Fuente: Autor . .	123
7.11. Respuestas RMS máximas de aceleraciones-Dirección X Fuente: Autor	123
7.12. Respuestas RMS máximas de aceleraciones-Dirección Y Fuente: Autor	124
7.13. Derivas máximas de piso-Dirección X Fuente: Autor	124
7.14. Derivas máximas de piso-Dirección Y Fuente: Autor	125
7.15. Criterios de desempeño para el controlador FLC-2 Fuente: Autor	125
7.16. Desplazamiento máximos y porcentajes de reducción para el piso 11 Fuente: Autor	143

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

A	Parámetro de histéresis.
a	Desviación estándar de la función gaussiana.
b	Media de función gaussiana.
C	Matriz de amortiguamiento.
c_1	Punto de rotura.
c_o	Coefficiente de amortiguamiento.
E	Energía total de fuerzas ambientales.
E_d	Energía disipada.
E_h	Energía irrecuperable disipada.
E_k	Energía cinética absoluta.
E_s	Energía de tensión elástica recuperable.
F	Fuerza.
f	Fuerza del dispositivo, frecuencia.
f_f	fuerza de fricción.
f_0	Fuerza inicial aplicada.
F_y	Fuerza de fluencia.
H	Magnitud del campo magnético.
K	Matriz de rigidez.
k_1	rigidez del acumulador.
k_0	Parámetro de rigidez.
M	Matriz de masa.
sgn	Función signo.
t	Tiempo.
T	Periodo.
x	Desplazamiento.
\dot{x}	velocidad del pistón.
x_0	Desplazamiento inicial.
z	Variable evolutiva.

Símbolos con letras griegas

β	Parámetro de histéresis.
η	Coefficiente de viscosidad.
η_d	Parámetro normalizado de desplazamiento.
η_v	Parámetro normalizado de velocidad.
γ	Parámetro de histéresis.
$\dot{\gamma}$	Deformación de cizallamiento.
τ_0	Tensión de fluencia.
τ	Tensión de corte aplicada, esfuerzo de cizallamiento.
τ_y	Tensión de fluencia.

Abreviaturas

ER	Fluido Electrorreológico.
FLC-1	Controlador basado de lógica difusa clásica.
FLC-2	Controlador basado de lógica difusa y algoritmos genéticos.
GA	Algoritmos genéticos.
MOP	Problema de optimización objetivo.
MR	Amortiguador magnetorreológico.
NG	Negativo grande.
NM	Negativo Mediano.
NP	Negativo pequeño.
NSGA-II	Algoritmo genético de clasificación no dominada.
PG	Positivo grande.
PM	Positivo mediano.
PP	Positivo pequeño.
ZO	Cero.

1. Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta una descripción general de las principales temáticas asociadas a esta tesis, entre las cuales se destacan: los sistemas de control estructural y las técnicas de programación basadas en algoritmos genéticos y lógica difusa. Adicionalmente, se exponen los objetivos principales de la investigación, junto con la correspondiente metodología de trabajo.

1.1. Generalidades del problema y justificación

Uno de los retos más desafiantes en la ingeniería civil, ha sido el de mitigar los efectos causados en la respuesta dinámica de las estructuras, ocasionados por cargas ambientales como es el caso de las fuerzas de sismo o de viento. Estos fenómenos afectan la integridad estructural de las edificaciones y ponen en riesgo la vida de sus ocupantes, causando tragedias humanas y enormes repercusiones económicas [1].

Los métodos de control estructural se han convertido en una de las principales herramientas para mejorar la capacidad de amortiguamiento de los diferentes sistemas estructurales, ampliando la posibilidad de mitigar los efectos adversos causados por cargas ambientales [2]. Su principal objetivo radica en abordar de una forma más eficiente los problemas de seguridad en el área de la ingeniería estructural [3].

Estos métodos pueden clasificarse de forma generalizada en cuatro grupos principales: control activo, control pasivo, control híbrido y control semi-activo [4]. Un sistema de control pasivo se caracteriza porque no requiere de una fuente de energía externa. Contrario a esto, los sistemas de control activo requieren de una fuente de potencia para alimentar actuadores que aplican fuerza a la estructura [5]. Por otro lado, los sistemas de control híbrido emplean una combinación de dispositivos activos y pasivos [6]. Los sistemas de control semi-activo se caracterizan por demandar una menor cantidad de energía externa en comparación con los sistemas convencionales, atrayendo de esta forma el interés en su utilización en los últimos años [7].

Dentro del grupo de sistemas de control semi-activo, se presenta un gran interés por el amortiguador magnetoreológico (Magnetorheological damper - MR damper). Estos dispositivos emplean fluidos magnéticos, los cuales pueden variar sus propiedades reológicas rápidamente en presencia de un campo magnético. Proporcionan fuerzas de amortiguamiento variables, alta estabilidad al sistema, robustez y fiabilidad. El costo de fabricación es económico en comparación con otros dispositivos de control y no son tan sensibles a los cambios de temperatura [8]. Debido a su simplicidad mecánica, alto rango dinámico y bajos requisitos de potencia, son considerados como buenos candidatos para reducir las vibraciones en las estructuras. Sin embargo, tienen la desventaja de ser mecanismos altamente no lineales, lo que dificulta su implementación en las edificaciones para generar fuerzas de amortiguamiento óptimas.

Las técnicas de programación basadas en Algoritmos Genéticos, (Genetic Algorithms, GA) se han caracterizado por ser eficientes en el control de sistemas dinámicos no lineales. Permiten solucionar problemas de optimización con un alto grado de complejidad, a través de búsquedas aleatorias regidas por el principio de la evolución.

Un algoritmo genético puede definirse como cualquier población basada en modelos que utilizan operadores de selección, combinación y mutación. Genera nuevas poblaciones en un espacio de búsqueda que tienen como propósito la optimización de un problema determinado [9].

El algoritmo genético de clasificación no dominada NSGA-II, (Non-Dominated Genetic Sorting Algorithm-NSGA-II) es un algoritmo de búsqueda orientado a encontrar soluciones no dominadas de problemas de optimización multi-objetivo y ha demostrado ser uno de los más eficientes en la resolución de este tipo de problemas [10]. Fue desarrollado por Deb et al. en 2002 [10]. A diferencia de los algoritmos genéticos tradicionales, el NSGA-II se caracteriza por tener un enfoque rápido de clasificación, un rápido procedimiento para la estimación de la distancia de hacinamiento y un operador de comparación de poblaciones simple.

En la lógica difusa se define el concepto de función de pertinencia o función de membresía, a cada una de reglas que determinan el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto difuso.

En esta tesis se diseñan dos tipos de controladores, el primero de ellos llamado FLC-1, fue desarrollado con lógica difusa tradicional y está compuesto por 49 reglas de inferencia, las cuales fueron obtenidas a partir de un análisis empírico propuesto por Liu. et al. [11]. El segundo controlador, que por simplicidad se denominará controlador FLC-2, se construyó mediante la programación de un algoritmo tipo NSGA-II combinado con lógica difusa y permite optimizar el número de reglas junto con los parámetros de las funciones de membresía.

Estos controladores fueron modelados numéricamente en dos edificaciones reales tipo pórtico plano y tipo pórtico tridimensional, bajo la acción de diferentes aceleraciones de suelo. Los resultados demuestran que ambos dispositivos mejoran significativamente la función de respuesta de las estructuras, respecto a los sistemas no controlados. Sin embargo, el controlador FLC-2, presenta los mejores índices de desempeño para las respuestas RMS de aceleraciones, RMS de desplazamientos y las derivas máximas de piso, en comparación con los resultados obtenidos con el controlador FLC-1.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Implementar una metodología basada en la programación de un algoritmo genético de clasificación no dominada, (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm NSGA-II) combinada con lógica difusa (Fuzzy Logic). Para administrar fuerzas de control en amortiguadores magnetoreológicos (MR Dampers), que permitan mejorar la respuesta estructural en sistemas aporticados.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Elaborar modelos numéricos que simulen el comportamiento estructural de edificaciones sometidas a la acción de cargas dinámicas.
- Desarrollar un controlador basado en un algoritmo genético tipo NSGA-II combinado con lógica difusa, que sea capaz de determinar y generar fuerzas óptimas de amortiguamiento.
- Analizar la respuesta estructural de los modelos numéricos elaborados ante diferentes cargas dinámicas, cuando a estos se les proporciona fuerzas de amortiguamiento a través del sistema de control desarrollado.
- Comparar la eficiencia del sistema de control propuesto con los resultados obtenidos para un sistema de control alternativo basado en lógica difusa clásica, mediante la cuantificación de diferentes índices de desempeño.

1.3. Metodología

En esta metodología se describe el procedimiento a través del cual se desarrolla esta investigación. Inicialmente, se presentan las características de los dos modelos numéricos tipo

pórtico plano y pórtico tridimensional que van a analizarse. Luego, se describen las propiedades del amortiguador MR, se exponen los aspectos más importantes de los sistemas de control desarrollados y se indica la forma mediante la cual se evaluará su desempeño para generar fuerzas de amortiguamiento controladas, a través del amortiguador MR empleado.

1.3.1. Definición de modelos numéricos

- **Estructura No.1:** Pórtico plano de 32 niveles de piso y 96 m de altura. El pórtico hace parte de una estructura real que se localiza en la ciudad de Medellín.
- **Estructura No.2:** Pórtico tridimensional de 11 niveles de piso y 39 m de altura. La estructura hace parte de una edificación que se encuentra en proceso de construcción en la ciudad de Medellín.

1.3.2. Definición del amortiguador MR

En ambas estructuras se emplean amortiguadores MR localizados en diferentes niveles de piso. Estos dispositivos tienen una capacidad de 200 kN y su rango de voltaje oscila entre 0 y 10 volts. En el capítulo 3 y en la sección 6.4, se describe de forma más detallada las propiedades y principios de funcionamiento de estos amortiguadores.

1.3.3. Desarrollo computacional

Se implementan dos sistemas de control (FLC-1 y FLC-2), sus principales características se describen de forma resumida a continuación:

- **Controlador FLC-1:** Controlador basado en lógica difusa tradicional. Está compuesto por 49 reglas de inferencia triangulares obtenidas de un análisis empírico propuesto por Liu. et al. [11]. Los parámetros de entrada del controlador son los desplazamientos y velocidades de la estructura. El único parámetro de salida es el voltaje requerido por el amortiguador MR, para generar las fuerzas de control estructural.
- **Controlador FLC-2:** Sistema de control desarrollado a partir de la combinación de un algoritmo genético tipo NSGA-II con lógica difusa. El controlador se compone de 20 reglas gaussianas y sus parámetros son optimizados a través del algoritmo genético implementado. Se utilizan los mismos parámetros de entrada y de salida que se emplearon para el controlador FLC-1.

1.3.4. Evaluación de los sistemas de control desarrollados

Se definen las características de masa, rigidez y amortiguamiento de las estructuras analizadas. Posteriormente, se construyen los modelos numéricos de las edificaciones y se evalúa la

eficiencia alcanzada por los controladores para generar fuerzas de amortiguamiento controladas. Adicionalmente, se analiza el efecto que producen estas fuerzas en la respuesta dinámica de los modelos estudiados.

1.3.5. Resumen del contenido

Capítulo 1: Este capítulo presenta una breve introducción a las principales temáticas a tratar en esta investigación, se definen los objetivos y la metodología de trabajo desarrollada.

Capítulo 2: Este capítulo presenta un tratado general de la teoría de control estructural. Adicionalmente, se describen las principales características de algunos dispositivos de control semi-activo.

Capítulo 3: Este capítulo presenta las principales características, metodologías de modelación y modos de operación de los amortiguadores magnetoreológicos.

Capítulo 4: Este capítulo presenta el desarrollo del procedimiento mediante el cual se propone el diseño del sistema de control basado en lógica difusa clásica.

Capítulo 5: Este capítulo presenta el desarrollo del procedimiento mediante el cual se propone el diseño del sistema de control basado en la combinación de lógica difusa y el algoritmo genético NSGA-II.

Capítulo 6: Este capítulo presenta la caracterización de las aceleraciones de suelo y los modelos numéricos desarrollados en los casos de estudio.

Capítulo 7: Este capítulo presenta los resultados de análisis obtenidos para los casos de estudio propuestos.

Capítulo 8: Este capítulo presenta una discusión de los resultados y las principales conclusiones asociadas con la implementación de los sistemas de control desarrollados.

2. Capítulo 2

Control Estructural

En este capítulo se realiza una breve introducción a la teoría de control estructural, destacando su incidencia en el desarrollo de sistemas de protección para mitigar los efectos adversos generados por cargas de origen dinámico en las estructuras. Bajo este enfoque, se definen las principales características, propiedades mecánicas y modos de operación de algunos dispositivos de control semi-activo.

2.1. Generalidades

La teoría de control estructural aplicada a la ingeniería civil tiene sus orígenes hace unos 120 años, cuando John Milne; un profesor de ingeniería en Japón realizó un experimento empírico mediante el cual construyó una pequeña casa de madera y la colocó sobre unos cojines para demostrar que la estructura podría aislarse [12]. Luego, a mediados del siglo XX se desarrolló la teoría de sistemas lineales y su aplicación en la dinámica estructural. Pero no fue hasta después de la segunda guerra mundial, cuando se realizaron grandes avances en la teoría y aplicación del control estructural, particularmente en problemas de seguimiento y estabilización (tracking) y problemas relacionados con estructuras espaciales [12]. Estas tecnologías fueron adaptadas rápidamente a la ingeniería civil, en aplicaciones de protección de puentes y edificios sometidos a cargas de viento y/o sismo [5].

En los últimos años han ocurrido devastadores sismos y huracanes alrededor de todo el mundo. Estos han causado grandes daños a las estructuras, afectaciones económicas relevantes y un elevado número de pérdidas humanas. Un ejemplo de ello lo demuestra el sismo de Japón en 2011, que con una magnitud de 9.0 en la escala de Richter provocó un tsunami que inundó las costas de este territorio, destruyó la central nuclear de Fukushima y dejó más de 15000 personas muertas. En 2005 el huracán Katrina fue uno de los más devastadores de los Estados Unidos, alcanzando velocidades hasta de 280 km/h. Este huracán causó pérdidas económicas de más de cien millones de dólares y dejó un saldo de 1836 personas fallecidas [13]. Este tipo de fenómenos demuestran las posibles consecuencias que pueden causar estas fuerzas de origen dinámico, en el comportamiento y desempeño de las estructuras.

De forma alternativa, algunos tipos de sistemas de protección estructural se han venido desarrollando para mitigar los efectos adversos originados por fuerzas dinámicas. Estos dispositivos funcionan absorbiendo o reflejando una porción de la energía de entrada, que de otro modo serían transmitidos de forma directa a las estructuras.

Considerando la relación que se presenta en la ecuación (2.1), se demuestra la posibilidad de reducir la demanda de disipación de energía mediante sistemas de protección estructural [14].

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \quad (2.1)$$

Donde E es la energía total de las fuerzas ambientales, E_k es la energía cinética absoluta, E_s es la energía de tensión elástica recuperable, E_h es la energía irrecuperable disipada a través de formas inelásticas u otras formas inherentes de amortiguación y E_d es la energía disipada por el sistema de protección estructural.

Recientemente se han venido desarrollando diversos dispositivos de control estructural que dependiendo de sus características físicas y de funcionamiento, pueden clasificarse de forma generalizada en cuatro grupos principales: sistemas de control pasivo, sistemas de control activo, sistemas de control híbrido y sistemas con control semi-activo, siendo este último grupo el foco principal de este trabajo.

2.2. Sistemas de control semi-activo

2.2.1. Generalidades sobre los sistemas de control semi-activo

Estos sistemas fueron propuestos a principios de los años 1920. Se emitieron patentes de amortiguadores que utilizaban una masa de apoyo elástica para activar una válvula hidráulica (no se requería energía). Alternativamente se utilizaban válvulas solenoides para direccionar el flujo de fluidos (se requería una pequeña cantidad de energía) [15]. En el área de control estructural, la primera aplicación desarrollada para este tipo de dispositivos fue hecha por Hrovat et al. en 1983 [16]. Propusieron un amortiguador de masa sintonizada semi-activo, (Semi-Active Tuned Mass Damper, SATMD) para controlar vibraciones inducidas por fuerzas de viento en edificios de gran altura.

Trabajos recientes han demostrado que los sistemas de control semi-activo mejoran significativamente la respuesta estructural de las edificaciones. Esto en comparación con los sistemas de control pasivo, llegando incluso a superar a los sistemas de control totalmente activos [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Los sistemas de control semi-activo funcionan como un punto intermedio entre los sistemas de control pasivos y activos, ya que mantienen la eficacia de un controlador de origen pasivo y al mismo tiempo aprovechan las ventajas de los parámetros ajustables de un sistema de control totalmente activo [25]. La Figura 2.1 presenta la configuración genérica de un sistema de control semi-activo.

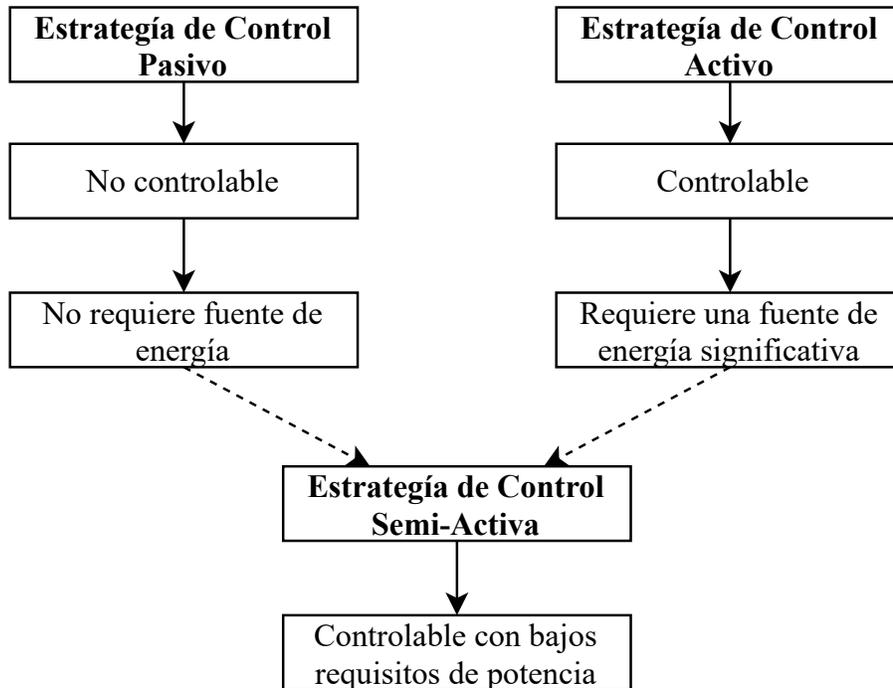


Figura 2.1.: Estrategia de control semi-activo.
Modificado de [25]

2.2.2. Definición genérica de un sistema de control semi-activo

Un sistema de control semi-activo puede definirse como un mecanismo que utiliza el movimiento de la estructura para desarrollar las fuerzas de control. Las magnitudes de estas fuerzas son ajustadas y calibradas a través de una fuente de energía externa, como puede ser el caso de una batería; por ejemplo. Esta condición de funcionamiento representa una gran ventaja, ya que generalmente durante un evento sísmico las fuentes de energía pueden fallar o ser suspendidas temporalmente.

Las fuerzas de control se desarrollan basándose en la retroalimentación de los sensores, que calculan la excitación y/o la respuesta de la estructura. Esta información de respuesta puede medirse en puntos diferentes al lugar en donde se encuentre localizado el sistema de control semi-activo [26].

Otra de las ventajas que tienen este tipo de controladores es que no pueden inyectar energía al sistema estructural, pues no tienen un nivel de potencia suficiente que pueda llegar a amenazar su integridad.

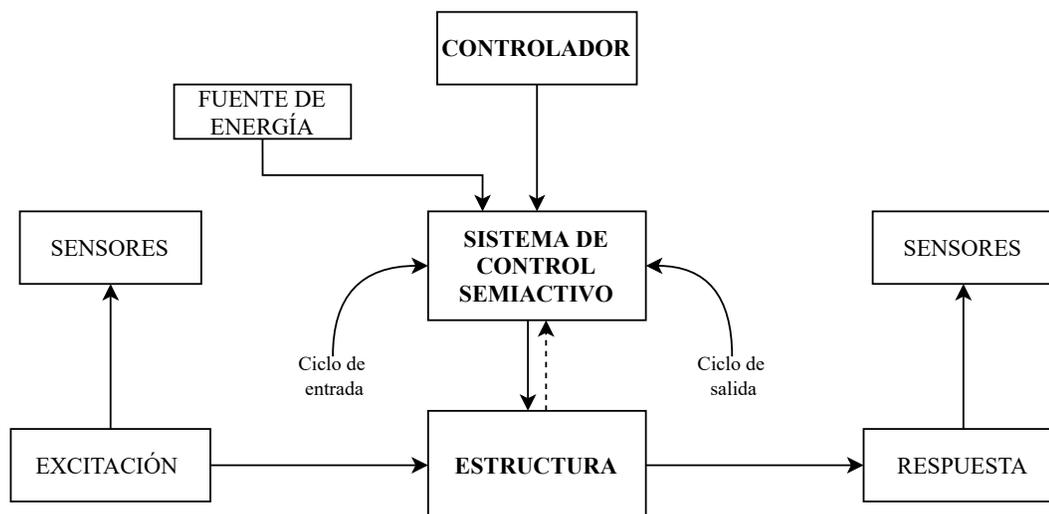


Figura 2.2.: Diagrama de bloques para un sistema de control semi-activo.
Modificado de [26]

En la Figura 2.2, se presenta un esquema básico que explica el principio de funcionamiento de un sistema de control semi-activo. Se observa que el controlador recibe la información de las fuerzas actuantes y la respuesta estructural a través de unos sensores. Con estos valores se generan las fuerzas de amortiguamiento en el sistema de control semi-activo, el cual se encuentra conectado a una fuente de energía externa.

Si bien en los sistemas de control activo se pueden implementar algoritmos de control directamente desde el controlador, esto no ocurre en los sistemas de control semi-activos, ya que son sistemas típicamente no lineales, debido a la no linealidad intrínseca de los dispositivos. El desarrollo de estrategias de control eficientes para estos elementos, sigue siendo un tema de investigación abierto en esta área de estudio [27].

2.3. Dispositivos de control semi-activo

En la Figura 2.3 se presentan algunos ejemplos de dispositivos de control semi-activo, cuyas características se analizarán con mayor detalle. Se incluyen amortiguadores de orificio variable, amortiguadores de fricción variable, amortiguadores de líquido ajustable y amortiguadores de fluido controlable.

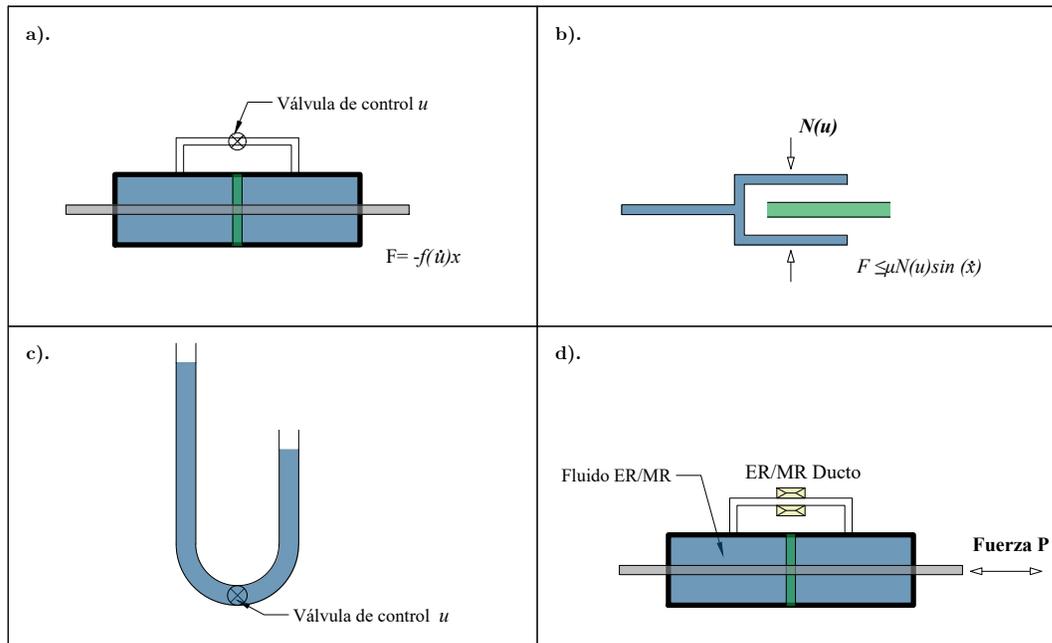


Figura 2.3.: Diagrama de bloques para un sistema de control semi-activo: a). amortiguadores de orificio variable, b). amortiguadores de fricción variable, c). amortiguadores de fluido sintonizado y d). amortiguadores de fluido controlable.

Modificado de [14]

2.3.1. Amortiguadores de orificio variable

Estos dispositivos permiten obtener una amortiguación cambiante a través de un orificio electromecánico variable que modifica la resistencia del fluido (ver Figura 2.3 a). Fueron introducidos inicialmente por algunos autores entre los cuales están Feng y Shinozuka [28], como sistemas para controlar movimientos en puentes generados por fuerzas de sismo.

Los sistemas de aislamiento que emplean este tipo de dispositivos han mostrado un rendimiento superior, en comparación con los sistemas de aislamiento de control pasivo [27].

2.3.2. Amortiguadores de fricción variable

Los amortiguadores de fricción variable utilizan las fuerzas de fricción para disipar la energía en los sistemas estructurales (ver Figura 2.3 b). Estos dispositivos emplean la fricción que se genera entre dos cuerpos sólidos, deslizándose entre ellos para proporcionar la energía de disipación deseada, la cual depende del desplazamiento del sistema al cual están conectados [29].

Entre los amortiguadores de fricción variable más comunes se encuentran los dispositivos desarrollados por Akbay- Aktam [30] y Kannan [31], en los cuales se emplea un eje que se encuentra conectado de forma rígida a un sistema de contraviento. El dispositivo utilizado por Feng et al. [32] emplea un sistema de aisladores de base combinado con un dispositivo semi-activo de fluido controlable y los dispositivos desarrollados por Yang y Agrawal [33], los cuales mejoran la función de respuesta en edificios con comportamiento no lineal.

2.3.3. Amortiguadores de fluido sintonizado semi-activos

Estos dispositivos de control semi-activo, emplean el desplazamiento de una columna de fluido para mejorar la función de respuesta de las estructuras (ver Figura 2.3 c). Se derivan de amortiguadores de desplazamiento sintonizado (Tuned Sloshing Damper-TSD) y de amortiguadores de columna de líquido sintonizados (Tuned Liquid Column Dampers -TLCD).

De forma similar a un amortiguador de masa sintonizada (Tuned Mass Damper- TMD), el TSD utiliza el fluido de un tanque para reducir la resonancia del sistema estructural. En el caso del TLCD la masa en movimiento corresponde a una columna de líquido. Ésta es impulsada por la vibración de la estructura, disipando una parte de la energía liberada por la carga dinámica y aumentando el amortiguamiento equivalente del sistema [34].

En los últimos años se han propuesto diferentes clases de dispositivos de fluido sintonizado semi-activo. Se han obtenido reducciones importantes en la respuesta estructural de hasta un 30 %, sobre los resultados obtenidos en diferentes simulaciones empleando sistemas de control pasivo [27]. Haroun et al. [35] introdujeron un amortiguador híbrido de columna de líquido (Hybrid Liquid Column Damper-HLCD), el cual funciona manteniendo una condición de amortiguamiento óptima a través de un orificio variable en el amortiguador TLCD. Lou et al.[36] desarrollaron un dispositivo TSD que tenía la capacidad de modificar la frecuencia natural del amortiguador. Finalmente, Yalla y Kareem [37] diseñaron un actuador electro-neumático que accionaba una válvula para modificar la sección transversal de un amortiguador de columna líquida sintonizado (Tuned Liquid Sloshing Damper-TLSD).

2.3.4. Amortiguadores de fluido controlable

Este tipo de amortiguadores forman otra clase de dispositivos semi-activos, funcionan empleando fluidos controlables contenidos en amortiguadores de orificio fijo (ver Figura 2.3 d). A diferencia de los dispositivos de control semi-activo que se mencionaron anteriormente, estos dispositivos utilizan líquidos graduables con la capacidad de cambiar fácilmente su viscosidad. Ésto permite que las partículas del amortiguador no tengan movimiento, a excepción del pistón del amortiguador. Esta característica los hace más confiables y seguros [27].

Comúnmente, se han utilizado dos clases de fluidos para este tipo de amortiguadores : fluidos electroreológicos (ER) y fluidos magnetoreológicos (MR). Estos se componen básicamente de partículas dieléctricas y magnéticamente polarizadas, suspendidas en un medio aceitoso. Tienen la capacidad de cambiar de forma reversible desde un estado viscoso lineal a un estado semisólido en fracciones de milisegundos, cuando se encuentran en presencia de un campo eléctrico o magnético, respectivamente [29]. Para describir el comportamiento de estos fluidos puede emplearse el modelo de viscoplasticidad de Phillips (1969) [38].

El descubrimiento de los fluidos ER Y MR tiene su origen en la década de 1940. Sin embargo, su aplicación en el área de la ingeniería estructural en el control de vibraciones ha sido reciente [24].

A continuación se presentan algunos aspectos importantes relacionados con los amortiguadores de fluido controlable que emplean fluidos ER (ER Dampers), mientras que en el Capítulo 3 se hace una descripción detallada de los amortiguadores que utilizan fluidos magnetoreológicos (MR Dampers).

Amortiguadores electroreológicos ER

Típicamente los amortiguadores ER están compuestos por un cilindro hidráulico que contiene partículas dieléctricas micrométricas, suspendidas en un fluido (generalmente aceite). En presencia de un campo eléctrico fuerte (2-7 kV/mm) estas partículas se polarizan y se alinean ofreciendo una mayor resistencia al flujo [26, 29].

La resistencia al corte de los fluidos ER puede ser modelada como un componente rígido seguido de un componente newtoniano. El modelo fenomenológico que define de mejor manera este comportamiento consiste en un elemento de fricción de Coulomb, en paralelo con un amortiguador viscoso lineal conocido con el nombre de viscoplasticidad de Bingham [39, 40, 41]. El nivel de esfuerzo-tensión en este modelo se define como:

$$\tau = \tau_y \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2) τ es la tensión de corte aplicada, τ_y es la tensión de fluencia, η es el coeficiente de viscosidad, γ es la deformación por cortante y $\text{sgn}(\cdot)$ es la función de signo, donde el sobrepunto indica la diferenciación con respecto al tiempo.

En la Figura 2.4 se muestra el comportamiento de un fluido ER gobernado por la ecuación (2.2), mientras que en la Figura 2.5 se presenta la respuesta histerética (Fuerza Vs Desplazamiento) para un material gobernado por el modelo de Bingham, sometido a una carga armónica.

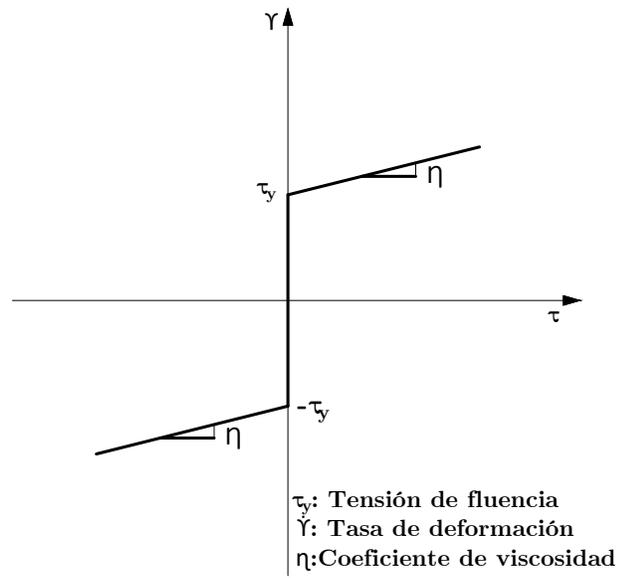


Figura 2.4.: Modelo de viscoplasticidad de Bingham para un fluido ER
Modificado de [29]

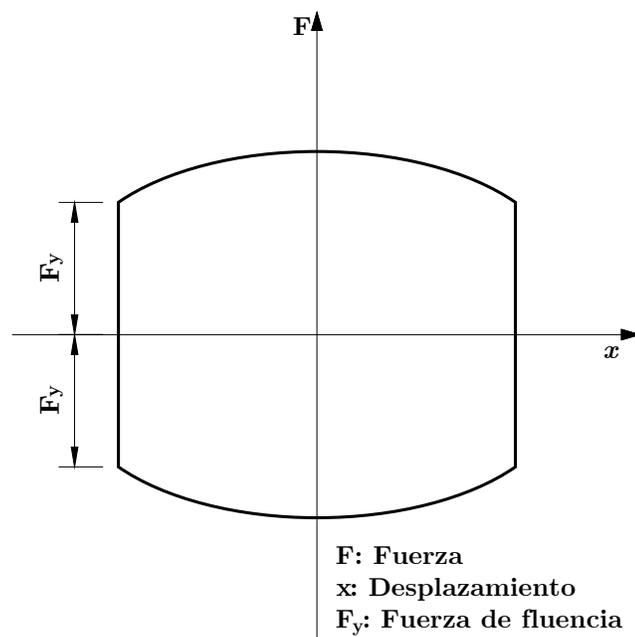


Figura 2.5.: Diagrama de histéresis sistema de control semi-activo.
Modificado de [29]

Finalmente, en la Tabla 2.1, se indican las propiedades físicas más relevantes de los fluidos ER.

Tabla 2.1.: Propiedades físicas de fluidos ER
Modificado de [29]

Propiedades	Características
Esfuerzo de fluencia	3.0-3.5 kPa
Rango de temperatura de funcionamiento	-25 a 125°C
Viscosidad plástica	0.10 a 0.70 Pa-s
Estabilidad	No tolera impurezas
$\eta_{\rho}/\tau_{\rho}^2$	$\approx 5 \times 10^8$
Fuente de alimentación	≈ 4000 V
Sedimentación de partículas	Milisegundos
Materiales	No tóxico y ambiente seguro

Los amortiguadores electroreológicos han sido ampliamente estudiados en el diseño de sistemas para el control estructural. Por ejemplo McClamroch et al. [42] desarrollaron un sistema de control para estructuras no lineales, que funciona a través de la modulación del campo eléctrico de un dispositivo ER. Gavin et al. [43] realizaron estudios experimentales para los ciclos de histéricos en amortiguadores ER y Nguyen y Choi [44] trabajaron en un estudio de un amortiguador ER considerando el comportamiento inestable del fluido, cuando éste pasa por el conductor anular del dispositivo.

3. Capítulo 3

Teoría Sobre Amortiguadores Magnetoreológicos MR

En este capítulo se describen las principales propiedades físicas, mecánicas y de funcionamiento de los amortiguadores magnetoreológicos (MR Dampers). Éstos constituyen uno de los principales focos de estudio tratados en esta tesis. Adicionalmente, se indican las características más relevantes de los modelos paramétricos y no paramétricos para amortiguadores MR.

3.1. Generalidades

Los amortiguadores magnetoreológicos MR, son dispositivos que se clasifican dentro del grupo de sistemas de control semi-activo. Estos elementos tienen la capacidad de generar fuerzas de amortiguamiento a gran escala, aplicables a estructuras. Requieren de una pequeña fuente de energía externa como puede ser el caso de una batería. Por este motivo, el costo asociado a su operación y funcionamiento es relativamente bajo.

El componente principal de los amortiguadores MR es un tipo de material inteligente que se usa para la absorción de impactos, fue descubierto en 1948 por J. Rabinow en la US National Bureau of Standards [45].

Otra de las particularidades que tienen los amortiguadores MR, es que su rendimiento no se ve afectado por los cambios de temperatura o por la presencia de impurezas en el fluido magnetoreológico, lo cual hace que sea un dispositivo eficiente para generar fuerzas de amortiguamiento y para transmitirlos de forma segura a las estructuras.

Un amortiguador MR es un dispositivo que se compone por un cilindro hidráulico que contiene partículas de tamaño micrométrico, magnéticamente polarizables y suspendidas en un fluido (normalmente aceite). El comportamiento del fluido MR se controla a través de un campo magnético. En ausencia de éste el fluido fluye libremente, mientras en presencia del campo magnético el flujo adquiere las características de un fluido semisólido [26].

Gracias a las anteriores características del material que compone los amortiguadores MR los investigadores se sienten cada vez más atraídos por estos dispositivos. En el área de la ingeniería civil estos amortiguadores se usan para reducir la respuesta dinámica en estructuras como puentes atirantados y edificaciones, cuando se encuentran sometidas a cargas fuertes de viento o de sismo. [46]

Debido al alto grado de no linealidad que presentan los amortiguadores MR, se dificulta de forma considerable su implementación en diferentes sistemas estructurales. Esta condición genera la necesidad de desarrollar algoritmos de control apropiados, que permitan aprovechar las propiedades del dispositivo y obtener altos rendimientos.

Algunas estrategias que se han desarrollado para administrar fuerzas de amortiguamiento en dispositivos MR se basan en el control del voltaje administrado al amortiguador para desarrollar fuerzas de amortiguamiento. Dyke et al. desarrollaron una estrategia de control basada en la retroalimentación de la aceleración [47]. Schurter y Roschke desarrollaron en 2001 un sistema de control basado en la combinación de lógica difusa y redes neuronales, la cual correlacionaba la aceleración de la estructura con el voltaje de salida del amortiguador [48]. Wang y Liao establecieron en 2005 un modelo basado en una red neuronal inversa como estrategia de control del voltaje en el amortiguador MR [49]. Finalmente, Nordin et al. establecieron en 2018 una estrategia de control basada en un sistema adaptativo para garantizar que el amortiguador MR tenga un buen rendimiento a altas frecuencias [50].

3.2. Fluidos Magnetoreológicos MR

Los fluidos magnetoreológicos (Magnetorheological fluids -MR) son una clase de materiales inteligentes, cuyas propiedades varían de forma considerable con la presencia de un campo magnético [51]. Fueron descubiertos a finales de la década de 1940 por Jacob Rabinow, en la US National Bureau of Standards [27].

Estos materiales tienen múltiples aplicaciones a nivel industrial. Desde válvulas MR en ingeniería química, hasta amortiguadores sísmicos en la ingeniería civil [52].

Los fluidos MR están compuestos por partículas magnetizables de tamaño micrométrico, se encuentran suspendidas en un fluido base. Tienen una consistencia semejante a la del aceite de motor y en condiciones normales fluyen libremente, pero en presencia de un campo magnético adquieren un momento dipolar alineado, lo cual hace que las partículas formen cadenas paralelas al campo [14].

Estos fluidos se dividen en tres partes principales:

- Un fluido base que tiene la función de transportar y combinar las características de lubricación y amortiguamiento [53].
- Partículas magnetizables compuestas generalmente por hierro carbonilado, hierro en polvo o aleaciones de hierro/cobalto. Éstas partículas son guiadas por el campo magnético para formar una estructura en forma de cadena [54].
- Aditivos que incluyen estabilizadores y tensoactivos. Estos elementos son necesarios para controlar la viscosidad del fluido, la velocidad de sedimentación de las partículas, la fricción entre partículas y evitar el engrosamiento de éstas después de un número de ciclos fuera de servicio [53].

En la Figura 3.1, se ilustra la idealización del comportamiento de un fluido MR con y sin la presencia de un campo magnético, mientras que en la Tabla 3.1 se presentan las propiedades de tres fluidos MR típicos. Los catálogos del proveedor se encuentran disponibles en [55].

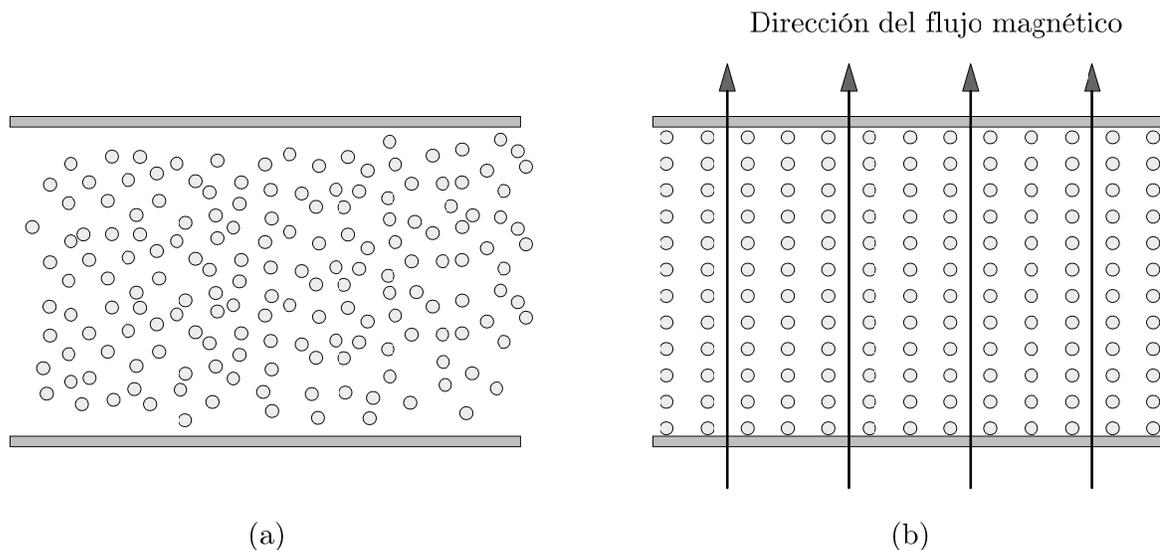


Figura 3.1.: Fluido MR: a). Sin campo magnético b). Con campo magnético.
Modificado de [52]

Tabla 3.1.: Propiedades de fluidos MR típicos
Modificado de [55]

Fluido MR	MR 140BC	MR-122EG	MR-122LF
Fluido base	Hidrocarburo	Hidrocarburo	Hidrocarburo
Temperatura de operación (°C)	-40-130	-40-130	-40-130
Densidad (g/cm ³)	3.75-3.95	2.28-2.48	2.64-2.84
Porcentaje de peso sólido (%)	86	72	78
Punto de fusión (°C)	>150	>150	>150
Viscosidad a 10 s ⁻¹ (Pa.s)	0.114	0.042	0.007
Apariencia	Gris oscuro	Gris oscuro	Gris oscuro

3.3. Modelos de fluidos MR

Se han propuesto diferentes ecuaciones teóricas que emulan la reología de los fluidos viscoplásticos [56]. Estas ecuaciones describen la relación entre el esfuerzo cortante τ y la velocidad de corte o de cizallamiento $\dot{\gamma}$, ya sea por una función lineal como en el caso del modelo plástico de Bingham, o por funciones no lineales como en los modelos propuestos por Herschel-Bulkley y Casson [57].

El modelo viscoplástico de Bingham se presenta gráficamente en la Figura 3.2. Este modelo se ajusta de forma adecuada al comportamiento de los fluidos MR, presenta una condición completamente rígida, seguida de una componente newtoniana. El esfuerzo de cizallamiento τ , se describe como:

$$\tau = \tau_0(H)\text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta\dot{\gamma} \quad (3.1)$$

En la ecuación (3.1) τ_0 es la tensión de fluencia causada por la excitación magnética aplicada, H es la magnitud del campo magnético aplicado, $\dot{\gamma}$ es la deformación de cizallamiento y η es el coeficiente de viscosidad. Este coeficiente se define como la pendiente de la gráfica de tensión de cizallamiento dada después de la fluencia, contra la velocidad de deformación por cortante.

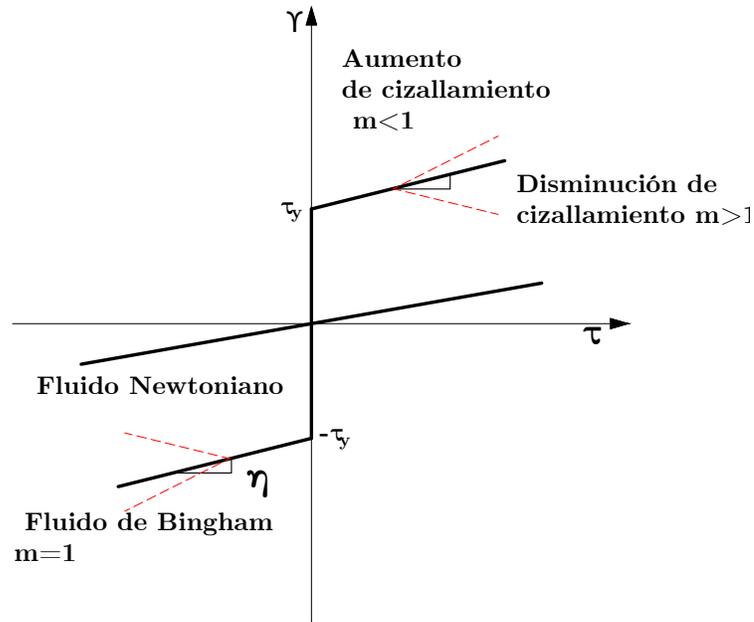


Figura 3.2.: Modelo viscoplastico de Bingham
Modificado de [14]

En la Tabla 3.2, se presenta un resumen de algunos modelos reológicos para fluidos MR con un límite elástico.

Tabla 3.2.: Modelos reológicos para fluidos MR con esfuerzo de fluencia
Modificado de [57]

Modelo Reológico	Expresión para la tensión de cizallamiento	Perfil de velocidad de cizallamiento
Bingham [58]	$\tau_{rx} = \tau_y + A\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{ry} - \tau_y}{A}$
Herschel-Bulkley [58]	$\tau_{ry} = \tau_y + [A\dot{\gamma}]^B$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau_{rx} - \tau_y)^{1/B}}{A}$
Robertson-Stiff [59]	$\tau_{rx} = A(\dot{\gamma} + C)^B$	$\dot{\gamma} = \left(\frac{\tau_{rx}}{A}\right)^{1/B} - C$
Modified Bingham [60]	$\tau_{rx} = \tau_y + A\dot{\gamma} + B\dot{\gamma}^2$	$\dot{\gamma} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 - 4B(\tau_y - \tau_{rx})}}{2B(\tau_y - \tau_{rx})}$
De Kee [60]	$\tau_{rx} = \tau_y + A\dot{\gamma}^2 e^{-B}$	$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{\tau_{rx} - \tau_y}{Ae^{-B}}}$
Vom Berg [61]	$\tau_{rx} = \tau_y + A \sinh^{-1}(\dot{\gamma}/B)$	$\dot{\gamma} = A\tau_{rx}^2 + B\tau_{rx} + C$

3.4. Características básicas de amortiguadores MR

La máxima fuerza que puede ser desarrollada por los amortiguadores magnetoreológicos, está ligada a las propiedades del fluido MR [14]. Bajo estas consideraciones Khan et al. [62] clasifican estos dispositivos en cuatro categorías según el principio de funcionamiento:

- **Amortiguadores en modo de flujo o de válvula:** Son amortiguadores compuestos típicamente por un cilindro y un pistón. Este tipo de amortiguadores pueden ser de vástago simple o compuesto y el campo magnético se aplica para controlar el fluido MR.
- **Amortiguadores en modo de cizallamiento directo:** Estos dispositivos son amortiguadores rotativos, compuestos principalmente por una carcasa, un electroiman, un eje y un fluido MR. Cuando el eje se somete a una vibración de torsión, el cizallamiento del fluido MR disipa la energía de vibración.
- **Amortiguadores en modo de compresión:** Este tipo de amortiguadores funciona moviendo un disco o deflector en una cámara de fluido MR, en la que el movimiento inicial es axial y el secundario es lateral.
- **Amortiguadores combinados en modo de flujo y cizalladura:** En estos amortiguadores se proporciona un espacio anular entre las paredes del cilindro y el pistón. El movimiento del pistón hace que el fluido fluya y que exista un esfuerzo de cizallamiento en todo el espacio anular. La bobina magnética se enrolla en el mismo pistón o en la superficie interior del cilindro [62].

En la Figura 3.3, se presenta un esquema básico de las tres primeras clases de amortiguadores MR descritas en la clasificación anterior.

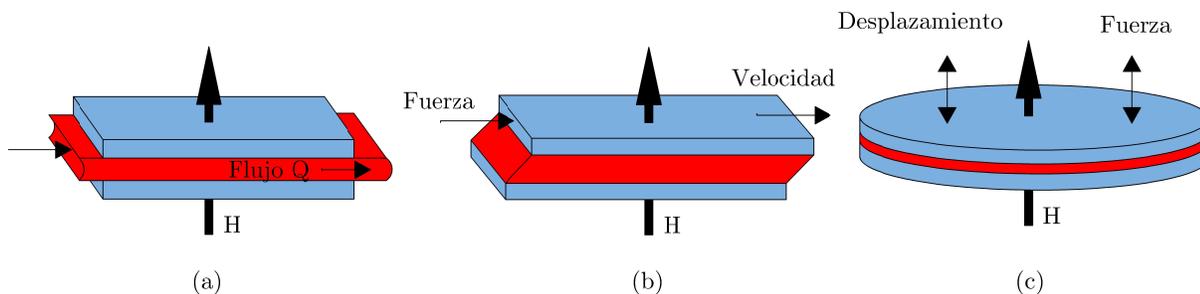


Figura 3.3.: Modos de operación para dispositivos que utilizan fluidos controlables: a). Válvula b). Cizallamiento directo c). Compresión.

Modificado de [29]

Generalmente en los diferentes tipos de estructuras que se estudian en la ingeniería civil, se requieren grandes fuerzas de amortiguamiento, ya que se generan desplazamientos considerables. Resulta inviable emplear amortiguadores que funcionen en modo de corte o de compresión [29]. Por esta razón, es más favorable emplear amortiguadores en modo de válvula o amortiguadores combinados en modo de flujo y cizalladura.

En la Figura 3.4 se presenta un prototipo de un amortiguador MR en escala real. Fue propuesto en la investigación desarrollada por Yang en 2001 [14] con la colaboración de LORD Corporation y el Structural Dynamics and Control/Earthquake Engineering Laboratory, en la universidad de Notre Dame.

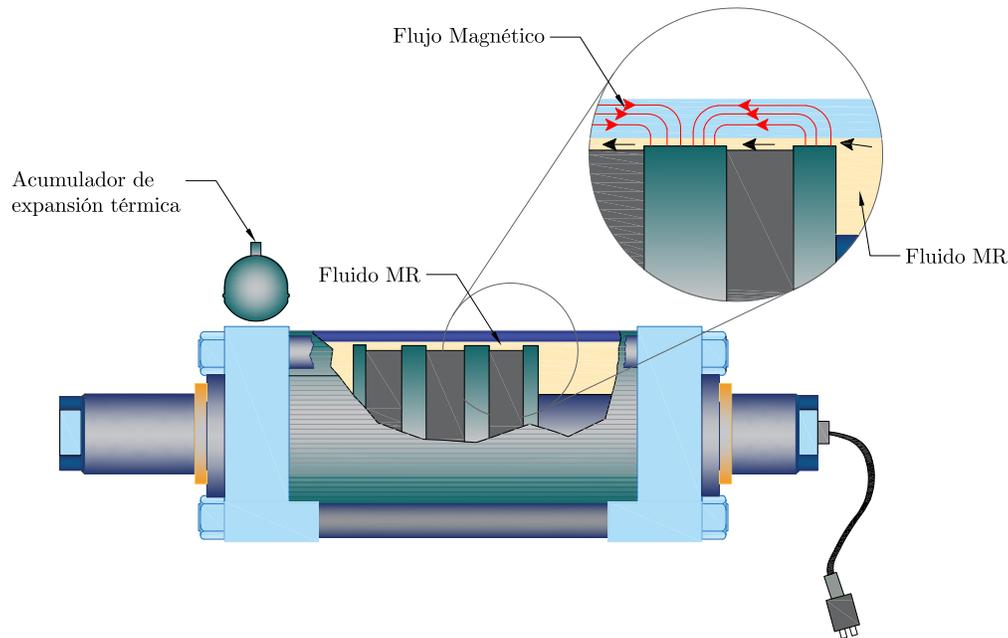


Figura 3.4.: Prototipo de amortiguador MR
Modificado de [14]

El dispositivo fue desarrollado para generar fuerzas de amortiguamiento de hasta 20 toneladas. El cilindro exterior forma parte del circuito magnético, mientras que el orificio efectivo del fluido es un espacio anular entre el diámetro exterior del pistón y el interior del cilindro del amortiguador. El movimiento del pistón hace que los fluidos se desplacen a través de toda la región anular [37].

En la literatura pueden consultarse otros ejemplos de amortiguadores MR construidos a escala real, entre los cuales es posible mencionar el SD-1000 MR desarrollado por Dyke y construido por Lord Corporation, tiene una capacidad de 3 kN [63]. El amortiguador desarrollado por la empresa Sanwa Tekki Corporation [64] con una capacidad de 20 ton.

3.5. Modelos de amortiguadores Magnetoreológicos MR

Existen diversos modelos numéricos que han sido desarrollados para simular el comportamiento de los amortiguadores MR. Adicionalmente, algunos modelos cuasi-estáticos que describen una adecuada modelación para las variables fuerza-desplazamiento, no son capaces

de emular de forma correcta los parámetros de fuerza-velocidad [14]. Para dar solución a esta condición se han desarrollado modelos matemáticos más precisos, los cuales se dividen en dos categorías: modelos no paramétricos y modelos paramétricos.

3.5.1. Modelos no paramétricos

Los modelos no paramétricos requieren una gran cantidad de datos experimentales que muestren la respuesta del dispositivo bajo diferentes casos de carga y condiciones de operación. Éstos se basan únicamente en el rendimiento del elemento [65], algunos de ellos se describen brevemente a continuación:

- **Modelo de Ehrgott y Masri:** Este modelo emplea polinomios ortogonales de Chebyshev bajo dos enfoques. En el primer caso, para emular la fuerza en función del desplazamiento y la velocidad. En el segundo caso, para modelar la fuerza en función de la velocidad y la aceleración [66].
- **Sistemas de redes neuronales:** Estos sistemas tienen la capacidad de modelar con un buen nivel de precisión el comportamiento de fluidos MR. Están basados en una metodología que simula el comportamiento del sistema nervioso (compuesto por neuronas y sinapsis). En este apartado se destacan los trabajos realizados por Chang y Roschke (1998) [67], en el cual proponen una red multicapa para la modelación de amortiguadores MR y el trabajo desarrollado por Wang y Liao (2001), quienes generaron una red neuronal recurrente, en la cual la salida se retrasa y se devuelve a la capa de entrada [68].

3.5.2. Modelos paramétricos

Los modelos paramétricos son aquellos en los cuales las características de los amortiguadores MR, son representados a través de una serie de elementos lineales y no lineales, con parámetros definidos tales como: la masas y resortes [69]. A continuación se describen algunos ejemplos de modelos paramétricos representativos:

Modelo de Bingham

Fue desarrollado por Stanway et al. [70, 71] para fluidos ER y adaptado por Spencer Jr. et al. [72], para un amortiguador de fluidos MR a pequeña escala. Consiste en un modelo de fricción en paralelo con un tubo de descarga, tal y como se presenta en la Figura 3.5.

La fuerza f generada por el dispositivo se calcula de acuerdo con la expresión dada en la ecuación (3.2):

$$f = f_f \text{sgn}(\dot{x}) + f_0 \quad (3.2)$$

Donde f_f es la fuerza de fricción que está relacionada con la tensión de fluencia del fluido, \dot{x} es la velocidad del pistón y f_0 es una fuerza inicial aplicada al sistema.

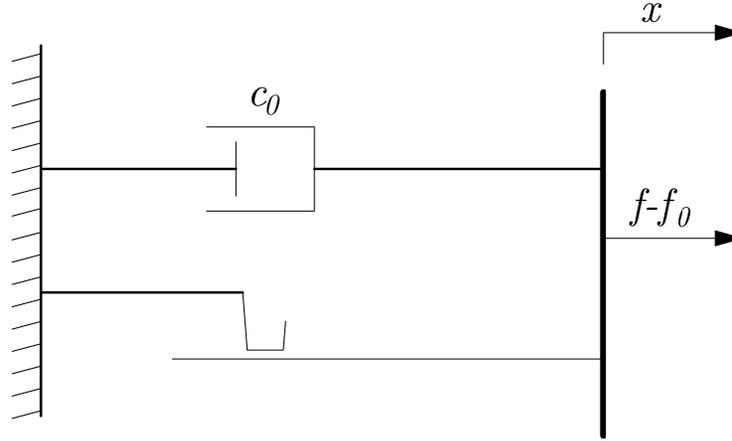


Figura 3.5.: Modelo de Bingham para amortiguadores MR
Modificado de [29]

Modelo de Gamota y Filisko

Es una versión ampliada del modelo de Bingham con un enfoque en la predicción del comportamiento de los materiales ER. Fue desarrollado por Gamota y Filisko [73]. Las ecuaciones que rigen el comportamiento de este modelo se dividen en dos partes:

Para $|f| > f_0$:

$$f = k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 \quad (3.3a)$$

$$f = c_0 \dot{x}_1 + f_f \text{sgn}(\dot{x}_1) + f_0 \quad (3.3b)$$

$$f = k_2(x_3 - x_2) + f_0 \quad (3.3c)$$

Para $|f| \leq f_0$:

$$f = k_1(x_2 - x_1) + c_1 \dot{x}_2 + f_0 \quad (3.4a)$$

$$= k_2(x_3 - x_1) + f_0 \quad (3.4b)$$

Donde c_0 es el coeficiente de amortiguamiento asociado con el modelo de Bingham; k_1 , k_2 y c_1 se asocian con el material sólido lineal.

En la Figura 3.6, se indica una representación gráfica de este modelo.

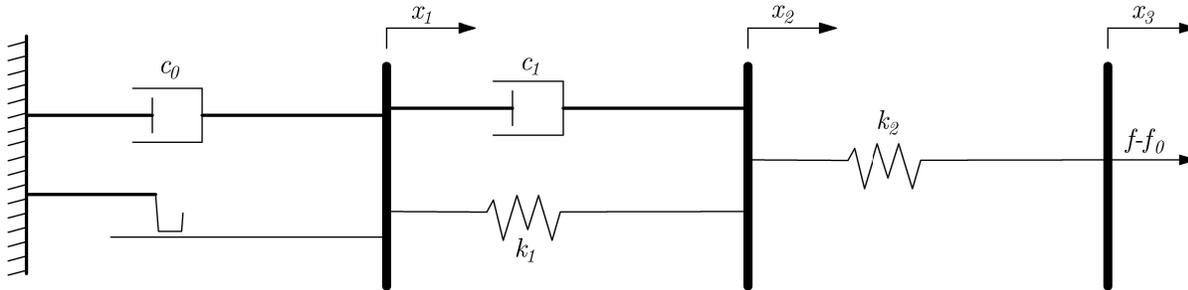


Figura 3.6.: Modelo de Gamota y Filisko
Modificado de [74]

Modelo de Bouc-Wen

El modelo de Bouc-Wen desarrollado por Wen en 1976, ha tenido éxito en la modelación de sistemas histeréticos [65]. En línea con esto, Spencer Jr. et al. [74] propusieron su uso para modelar el comportamiento de amortiguadores con fluidos MR. Un esquema representativo de este modelo se ilustra en la Figura 3.7.

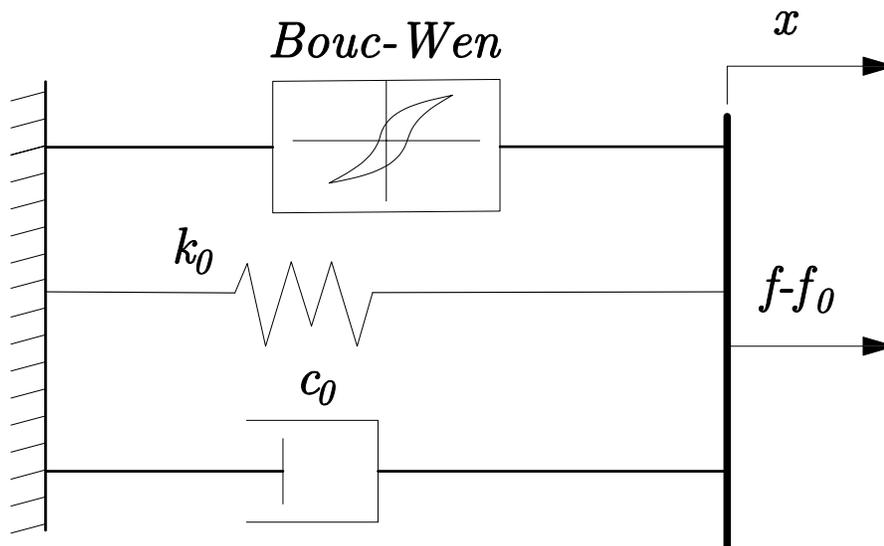


Figura 3.7.: Modelo de Bouc-Wen para amortiguadores MR
Modificado de [74]

La ecuación (3.5) describe la fuerza generada por el dispositivo en el modelo de Bouc-Wen:

$$f = c_0 \dot{x} + k_0 (x - x_0) + \alpha z \quad (3.5)$$

Donde c_0 es el coeficiente de amortiguamiento, k_0 es el parámetro de rigidez del resorte, x_0 es el desplazamiento inicial del resorte k_0 , α es el parámetro de Bouc-Wen asociado con el esfuerzo de fluencia del fluido MR y z es la variable evolutiva la cual se calcula con la expresión dada en la ecuación (3.6):

$$z = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A\dot{x} \quad (3.6)$$

En esta ecuación, γ , β y A son los parámetros que se encargan de ajustar el sistema de histéresis, determinando la linealidad en la región donde no hay carga; así como la suavidad en la transición de las regiones de pre-drenaje y post-drenaje.

Modelo fenomenológico

Spencer Jr. et al. propusieron un modelo paramétrico para mejorar el comportamiento del diagrama fuerza-velocidad de los amortiguadores. Se conoce como el modelo fenomenológico [74]. En la Figura 3.8 se presenta un esquema general de este modelo, que consiste en el modelo original de Bouc-Wen con un amortiguador colocado en serie y un resorte en paralelo.

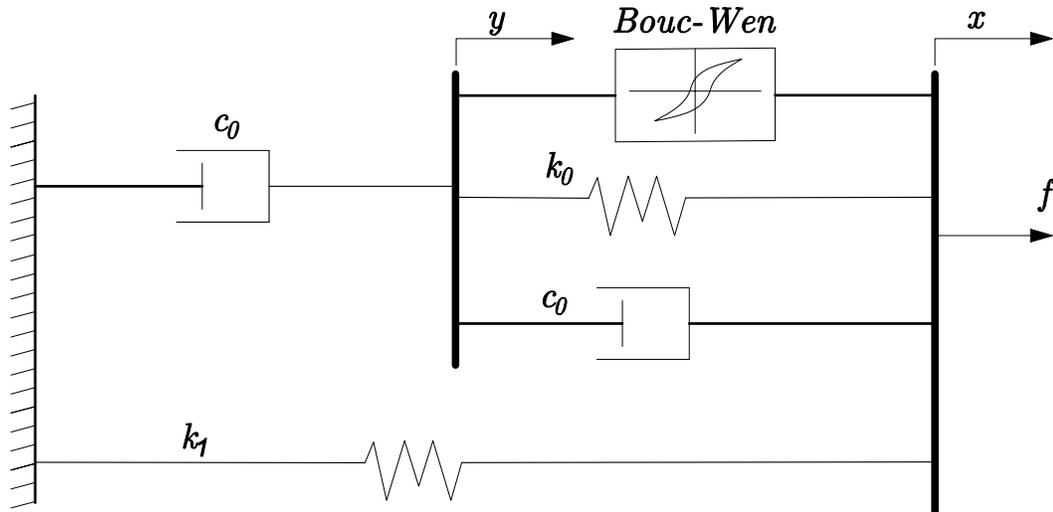


Figura 3.8.: Modelo fenomenológico para amortiguadores MR
Modificado de [74]

Para obtener las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del modelo fenomenológico, éste se divide en dos partes. En primera instancia sólo se considera el amortiguador en serie y el modelo de Bouc- Wen original. De esta forma se tiene la siguiente expresión:

$$c_1 \dot{y} = \alpha z + k_0 (x - y) + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) \quad (3.7)$$

Donde la variable evolutiva z está dada por la ecuación (3.8):

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z| |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (3.8)$$

Despejando \dot{y} de la ecuación (3.7) se obtiene:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y)] \quad (3.9)$$

Finalmente, la fuerza total generada por el sistema está dada por la ecuación (3.10):

$$f = \alpha z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) + k_1 (x - x_0) \quad (3.10)$$

Al sustituir la ecuación (3.7) en la ecuación (3.10), se obtiene la expresión para determinar la fuerza del dispositivo MR en el modelo fenomenológico. Ver ecuación (3.11).

$$f = c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_0) \quad (3.11)$$

En este modelo c_0 es el amortiguamiento viscoso observado a grandes velocidades, k_1 representa la rigidez del acumulador, c_1 es un punto de rotura que se incluye para representar la disminución que se observó en los datos experimentales a baja velocidad, k_0 está presente para controlar la rigidez a grandes velocidades y x_0 es el desplazamiento inicial asociado al resorte k_1 , que se asocia a la fuerza inicial del amortiguador debida al acumulador.

Los parámetros α , c_0 y c_1 son funciones que dependen del voltaje aplicado y se determinan mediante las ecuaciones (3.12):

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3.12a)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (3.12b)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} u \quad (3.12c)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v)u \quad (3.12d)$$

Donde u y v son los voltajes de entrada y de salida para el filtro de primer orden, respectivamente y η es la constante de tiempo para el filtro de primer orden. Las variables α_a , α_b , c_{0a} , c_{0b} , c_{1a} y c_{1b} son parámetros fijos que relacionan la fuerza del amortiguador MR con el voltaje aplicado al conductor de corriente y la corriente magnética resultante.

Dentro del grupo de modelos numéricos que existen para evaluar el comportamiento de amortiguadores de fluidos controlables, el modelo fenomenológico se caracteriza por su simplicidad numérica y facilidad para representar de forma adecuada el comportamiento de los amortiguadores MR.

Al comparar este modelo con otras estrategias de idealización, se encuentra que el modelo fenomenológico es preciso para un amplia gama de condiciones de funcionamiento y es apropiado para el desarrollo de algoritmos de control y evaluación de sistemas [74].

Los sistemas de control que fueron desarrollados en esta tesis para administrar fuerzas en amortiguadores MR, se realizaron empleando el modelo fenomenológico. Los parámetros que se utilizaron en este modelo se describen con mayor detalle en la sección 6.4.

4. Capítulo 4

Sistema de Control Basado en Lógica Difusa Clásica FLC-1

En este capítulo se exponen los principales conceptos relacionados con el desarrollo de proyectos de control basados en lógica difusa, los cuales permiten resolver de una forma más simple la modelación matemática de eventos altamente no lineales, como es el caso de la respuesta estructural que experimentan las edificaciones cuando se encuentran sometidas a la acción de cargas ambientales. Adicionalmente se presenta el diseño del controlador FLC-1, el cual será empleado para generar fuerzas de control en los sistemas estructurales analizados.

4.1. Generalidades

Uno de los grandes desafíos en el uso de sistemas de control basados en amortiguadores MR, se asocia con el hecho de tener la posibilidad de desarrollar algoritmos de control que sean aplicables a estructuras en escala real [75].

En la literatura se puede encontrar una gran cantidad de estrategias enfocadas a reducir la función de respuesta de las edificaciones que estén equipadas con amortiguadores MR [76]. Entre estas se destacan: el control óptimo ajustado (clipped optimal control) [77], estrategias de control basadas en la teoría de estabilidad de Lyapunov [78], métodos de control estocástico [79], modos de deslizamiento continuo (Continuous Sliding Mode-CSD) [80], el método del regulador cuadrático lineal (linear quadratic regulator method LQR) [81], entre otros.

Las estrategias de control descritas en el párrafo anterior se clasifican como métodos convencionales basados en modelos matemáticos explícitos.

Como se mencionó en el Capítulo 3, el comportamiento de los amortiguadores MR es altamente no lineal. Adicionalmente, si se tienen en cuenta las no linealidades que los sistemas estructurales pueden llegar a experimentar cuando están expuestos a cargas de origen dinámico, implementar un algoritmo de control inteligente basado en lógica difusa se considera un reto importante.

Una de las grandes fortalezas de los sistemas de control basados en lógica difusa, es su capacidad para incorporar conocimientos representados de forma lingüística, en vez de utilizar modelos matemáticos complejos [75].

4.2. Teoría general de la lógica difusa

La lógica difusa (Fuzzy Logic-FL) consiste en una serie de ajustes simples y fáciles de entender, obtenidos mediante la observación y racionalización del comportamiento de un sistema determinado [29]. Fue introducida por Zadeh en 1975, a quien se le considera como el padre de esta teoría. El desarrollo de este concepto inició en este año, pero solo fue hasta finales de los años 1990 en donde se publicaron algunas contribuciones importantes de diversos investigadores, tales como: Dubois and Prade [82], Mizumoto and Tanaka [83] y Norwich and Turksen [84].

Los sistemas de control basados en lógica difusa se han convertido en una de las áreas más activas y fructíferas para la investigación aplicada a conjuntos difusos. Algunas aplicaciones en sistemas de control de calidad del agua [85], funcionamiento automático de grúas de contenedores [86], control de reactores nucleares [87] y control sísmico de estructuras [88], han definido la base para un desarrollo eficaz de este tipo de procesos que por naturaleza resultan ser complejos.

La lógica difusa en la cual se basan los sistemas de control difuso, se encuentra mucho más cerca del pensamiento humano y del lenguaje natural, que los sistemas de control lógico tradicionales, proporcionando un medio eficaz para capturar la naturaleza inexacta y aproximada del mundo real [89].

Visto de otro modo, la lógica difusa es un conjunto de reglas de control lingüístico que relaciona los conceptos duales de implicación difusa y reglas de inferencia composicional mediante un controlador de lógica difusa (Fuzzy Logic Controller-FLC).

En esencia, un FLC proporciona un algoritmo que puede convertir una estrategia de control lingüístico basado en el conocimiento de expertos en una estrategia de control automático [90]. En particular esta estrategia aparece cuando el proceso de análisis se hace muy complejo utilizando técnicas convencionales o cuando la información disponible es interpretada de forma cualitativa, inexacta o con incertidumbre.

De acuerdo con Lee [89], un controlador de lógica difusa se compone de cuatro elementos fundamentales: un conocimiento base, una interfaz de fuzzificación, un sistema de inferencia y una interfaz de defuzzificación.

El conocimiento de expertos es almacenado en el conocimiento base en forma de reglas de control lingüístico. La interfaz de fuzzificación se usa para transformar datos nítidos en datos difusos. El sistema de inferencia es el corazón del controlador y proporciona un razonamiento aproximado tomando como referencia el conocimiento base. La interfaz de defuzzificación traslada la acción del controlador difuso a una acción de control no difuso.

El comportamiento dinámico de los sistemas difusos se caracteriza por reglas de descripción lingüística basadas en el conocimiento de expertos, tienen la forma de un condicional “si entonces...” (If then...). Si se cumplen un conjunto de condiciones, entonces un conjunto de consecuencias se pueden inferir [89].

El antecedente y el consecuente del condicional se conocen como declaraciones condicionales difusas. Además, varias variables pueden estar involucradas en el antecedente y consecuente. En este caso se llaman sistemas difusos multi-input multi-output [90].

Las reglas de control difuso proporcionan una forma conveniente para expresar la política de control y el dominio del conocimiento, el cual tiene dos componentes: una base de datos que contiene la definición de las variables lingüísticas que se usan en el antecedente y consecuente y un conjunto de reglas base que corresponde a la colección de reglas de control difuso, las cuales representan el conocimiento de expertos.

En la Figura 4.1, se presenta un esquema básico que describe el funcionamiento de un FLC, en el cual se observa que los parámetros del problema pasan por una interfaz de fuzzificación, se toma una decisión en el sistema de inferencia y se defuzzifica la decisión tomada en la interfaz de defuzzificación.

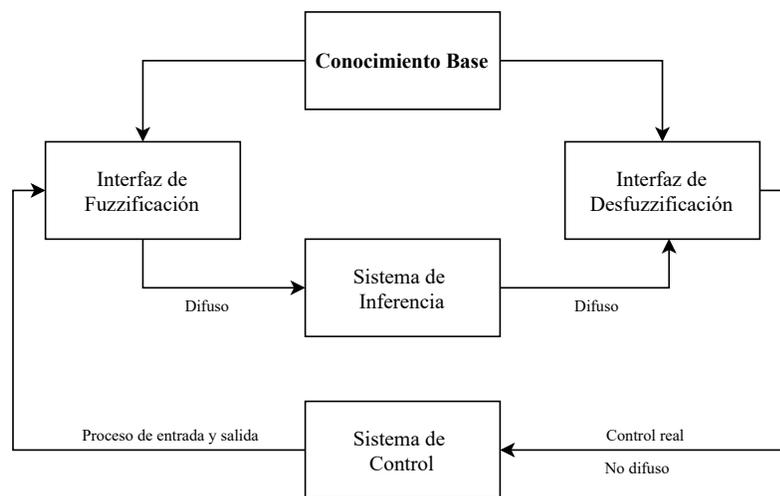


Figura 4.1.: Configuración básica de un controlador de lógica difusa FLC
Modificado de [89]

4.3. Consideraciones básicas de la lógica difusa

4.3.1. Conjuntos difusos

Los conjuntos difusos contienen grados de pertinencia variable y están conformados por elementos que pueden ser miembros de diferentes conjuntos difusos, siempre y cuando se encuentren relacionados en el mismo universo [29]. En lógica difusa se distinguen dos clases de conjuntos:

Conjuntos difusos tipo 1

En este tipo de conjuntos el grado de incertidumbre se representa con números que generalmente se encuentran en el rango (0,1). Se consideran de gran utilidad en situaciones donde las funciones de pertinencia pueden determinarse de forma exacta a través de un único valor numérico [91]. Genéricamente este tipo de conjuntos se representa tal y como se describe en la ecuación (4.1):

$$\mu_A(x) \in [0, 1] \quad (4.1)$$

Donde $\mu_A(x)$ representa el grado de pertenencia del elemento x , del conjunto difuso A . De esta forma el valor en el intervalo unitario que mide el grado de pertinencia del elemento x , pertenece al conjunto A .

Bajo esta consideración, al definir X como un universo finito y discreto, el conjunto difuso A referido en la ecuación (4.1) puede reescribirse como:

$$A = \sum_i \frac{\mu_A(x)}{x_i} \quad (4.2)$$

Cuando el universo X es continuo e infinito, el conjunto difuso A se representa como se define en la ecuación (4.3):

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x} dx \quad (4.3)$$

El concepto de grado de pertinencia es el que más diferencia la lógica difusa de la lógica tradicional. Esta condición hace que el rango de valores de pertinencia de un elemento de un conjunto, tenga la posibilidad de variar en el rango (0 ,1) en lugar de limitarse a uno de los valores del par $\{0, 1\}$.

Conjuntos difusos tipo 2

Corresponde a una versión extendida o generalizada de los conjuntos difusos tipo 1, ya que proporcionan un nivel significativo de modelado de impresión [92]. Ofrecen metodologías

para manejar las incertidumbres relacionadas con la lingüística, teniendo en cuenta la falta de fiabilidad y la vaguedad de la información [93].

Con el propósito de clarificar los conceptos trabajados hasta este momento, se presenta el siguiente ejemplo de aplicación:

Ejemplo de aplicación.

Supóngase que después de realizar un experimento en el cual se midió la temperatura de cinco recipientes R_i que contienen un fluido determinado, se obtuvieron los siguientes resultados: $R_1 = 0^\circ\text{C}$, $R_2 = 20^\circ\text{C}$, $R_3 = 30^\circ\text{C}$, $R_4 = 57^\circ\text{C}$ y $R_5 = 80^\circ\text{C}$. Adicionalmente, se conoce que la temperatura del fluido puede oscilar en el intervalo $[0^\circ\text{C } 100^\circ\text{C}]$.

Determinar el grado de pertinencia que tienen las mediciones tomadas en los conjuntos difusos Frío, Tibio y Caliente, de acuerdo con la función de pertinencia que se presenta en la Figura 4.2:

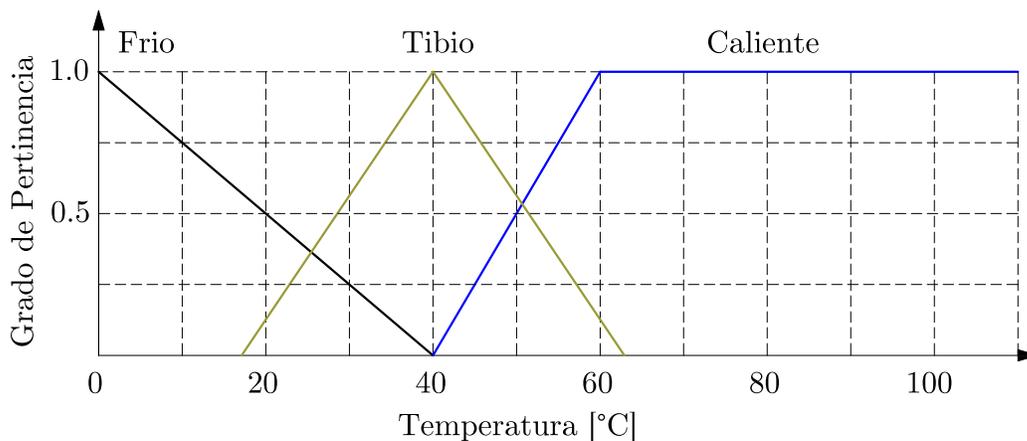


Figura 4.2.: Función de pertinencia de la temperatura

Fuente: Autor

Solución.

Con la información proporcionada se identifican los siguientes parámetros del problema:

Variable lingüística: Temperatura.

Universo de estudio U: Corresponde al rango de temperaturas posibles que puede alcanzar el fluido; es decir, $U = \{0^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}, \dots, 100^\circ\text{C}\}$.

Conjuntos difusos: {Frío}, {Tibio} y {Caliente}.

Teniendo en cuenta la función de pertinencia que se presenta en la Figura 4.2, se determinan los grados de pertinencia asociados a cada lectura de temperatura:

$$\mathbf{Frio} = \{1/0^{\circ}C, 0.50/20^{\circ}C, 0.25/30^{\circ}C\}.$$

$$\mathbf{Tibio} = \{0.13/20^{\circ}C, 0.56/30^{\circ}C, 0.25/57^{\circ}C\}.$$

$$\mathbf{Caliente} = \{0.80/57^{\circ}C, 1.0/80^{\circ}C\}.$$

En el caso del valor de temperatura tomado para el recipiente $R_2 = 20^{\circ}C$, se tiene un grado de pertinencia de 0.50 en el conjunto difuso Frio y 0.13 en el conjunto difuso Tibio. Por otra parte, para el caso del valor de temperatura medido en el recipiente $R_5 = 80^{\circ}C$, se tiene un valor de pertinencia de 1.0 en el conjunto difuso Caliente. Adicionalmente este elemento no tiene un valor de pertinencia asociado en los otros conjuntos difusos.

4.3.2. Geometría de la funciones de pertinencia

La geometría que adquieren los conjuntos difusos puede ser variable, contemplando funciones de pertenencia continuas o discretas. A continuación se presentan algunos ejemplos característicos:

Función triangular

$$f(x; \beta, \gamma) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{\gamma - x}{\gamma - \beta}, & \beta \leq x \leq \gamma \\ 0, & x > \gamma \end{cases} \quad (4.4)$$

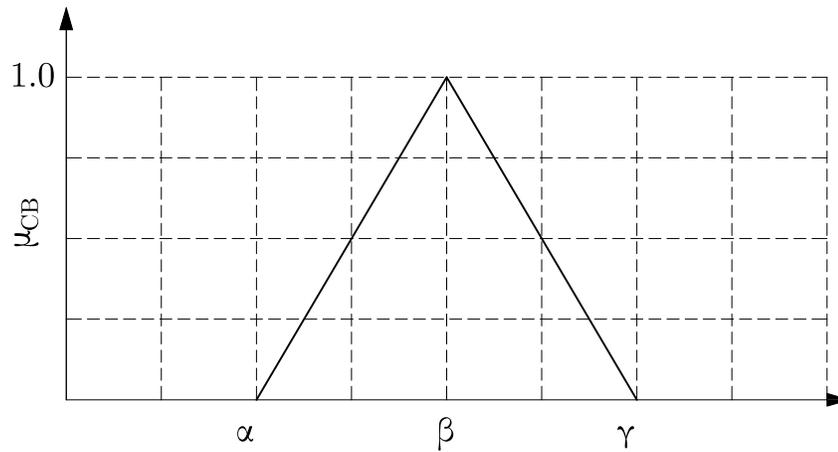


Figura 4.3.: Função de pertinência triangular
Modificado de [94]

Função trapezoidal (lineal a tramos)

$$f(x; \alpha, \beta, \gamma, \delta) \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & \beta \leq x \leq \gamma \\ \frac{\delta - x}{\delta - \gamma}, & \gamma \leq x \leq \delta \\ 0, & x > \delta \end{cases} \quad (4.5)$$

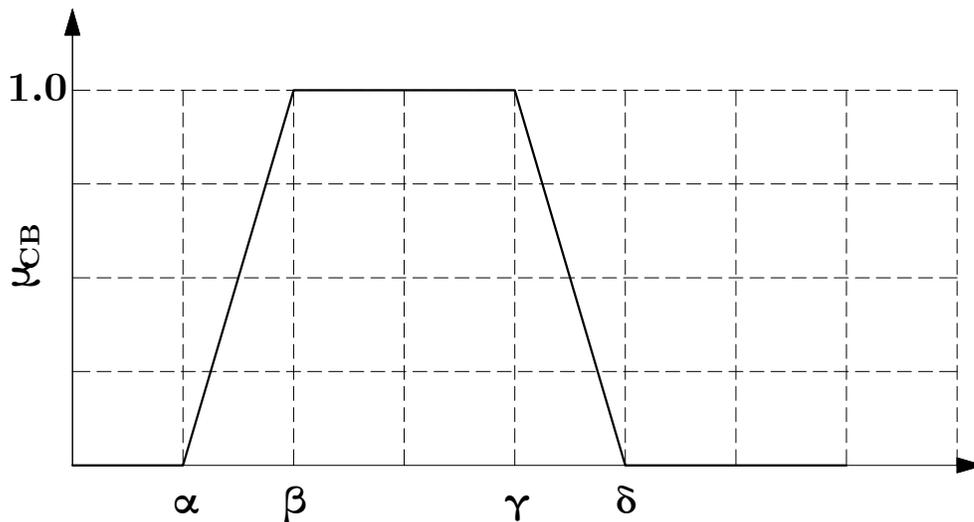


Figura 4.4.: Função de pertinência trapezoidal
Modificado de [94]

Función de incremento no lineal o tipo S

$$S(x; \alpha, \beta, \gamma) \begin{cases} 0, & z \leq \alpha \\ 2 \left(\frac{x - \alpha}{\gamma - \alpha} \right)^2, & \beta \leq x \leq \gamma \\ 1 - 2 \left(\frac{x - \alpha}{\gamma - \alpha} \right)^2, & \beta < x \leq \gamma \\ 1, & x > \gamma \end{cases} \quad (4.6)$$

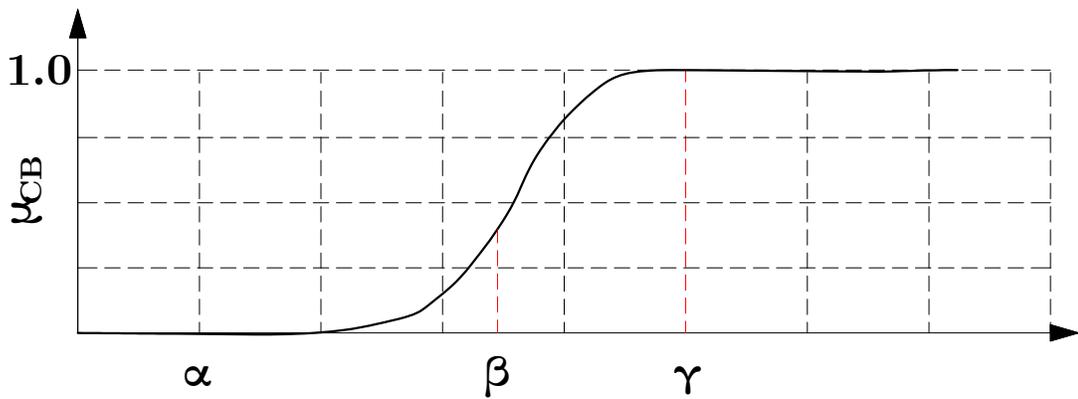


Figura 4.5.: Función de pertenencia tipo S
Modificado de [94]

Función Gaussiana

$$f(x, \sigma, \mu) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.7)$$

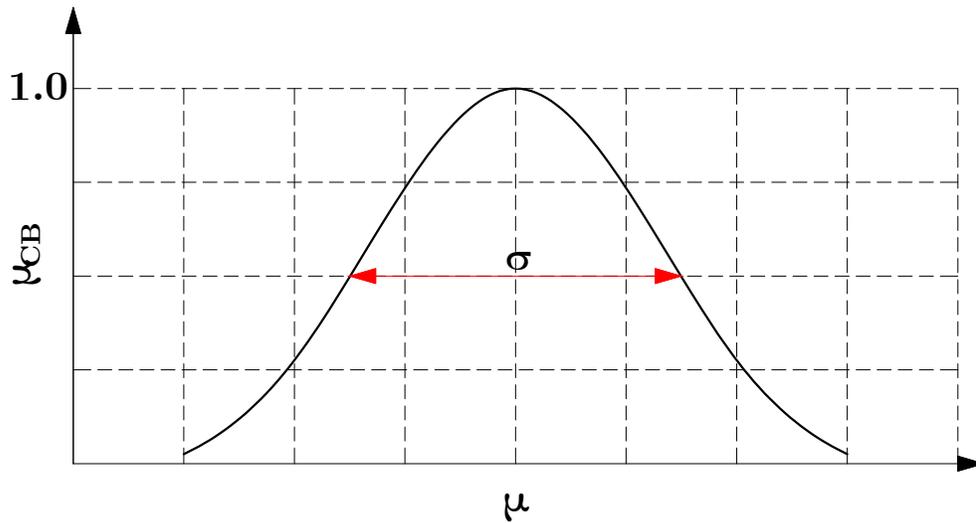


Figura 4.6.: Función de pertinencia tipo gaussiana
Modificado de [94]

Algunos ejemplos de otras formas que pueden adquirir estas funciones, se encuentran en los trabajos de Harris. J [95], Klir y Yuan [96] y Chen y Pham [97].

4.3.3. Fuzzificación

Corresponde a la primera etapa de un proyecto que emplea lógica difusa como herramienta de análisis y este puede definirse como el proceso a través del cual se convierten las entradas numéricas en conjuntos difusos (elementos unitarios) [29]. Estos valores deben ser designados como coeficientes de pertinencia de uno o más conjuntos difusos.

4.3.4. Toma de decisiones

Corresponde a la segunda etapa del desarrollo de un proyecto que utiliza lógica difusa, en la cual se toman las decisiones de acuerdo con el motor de inferencia o reglas difusas del proyecto. En la etapa final de este paso se obtienen los valores de salida.

4.3.5. Desfuzzificación

Es el último paso que tiene la lógica difusa. A través de este se reduce el conjunto difuso de salida obtenido al final la etapa de toma de decisiones, convirtiéndolo en un único valor numérico. Existen diversos métodos numéricos para efectuar la desfuzzificación. A continuación se mencionan los más comunes:

Método del Centroide

El valor de desfuzzificación de un conjunto difuso C se define como el centroide de este:

$$z_0 = \frac{\int_w zC(z)dz}{\int_w c(z)dz} \quad (4.8)$$

El cálculo del valor de desfuzzificación se simplifica si se considera un universo finito W y una función de pertinencia discreta $C(w)$:

$$z_0 = \frac{\sum z_j C(z_j)dz}{\sum c(z_j)} \quad (4.9)$$

Método del primer máximo

El valor de desfuzzificación de un conjunto difuso C , es su elemento maximizador más pequeño, es decir:

$$z_0 = \min \{z \mid C(z) = \max_w C(w)\} \quad (4.10)$$

Método del máximo promedio

El valor de desfuzzificación de un conjunto difuso discreto C , se define como el promedio de todos los valores del universo que contiene los máximos grados de pertinencia.

$$z_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n z_j \quad (4.11)$$

Donde C es el conjunto de elementos del universo W , los cuales contienen el máximo valor de C . Si C no es discreto, el valor de desfuzzificación del conjunto difuso C se define como:

$$z_0 = \frac{\int_G z dz}{\int_G dz} \quad (4.12)$$

Donde G hace referencia al conjunto maximizador del elemento C .

Método del máximo criterio

Este método toma un valor arbitrario del conjunto maximizador de los elementos de C , es decir:

$$z_0 = \{z \mid C(z) = \max_w C_w(w)\} \quad (4.13)$$

4.4. Diseño del Controlador FLC-1 propuesto

En la Figura 4.7 se presenta el diagrama de flujo para el sistema de control basado en lógica difusa clásica propuesto para esta tesis, su configuración y esquema operacional se fundamenta en los trabajos desarrollados por [11, 65].

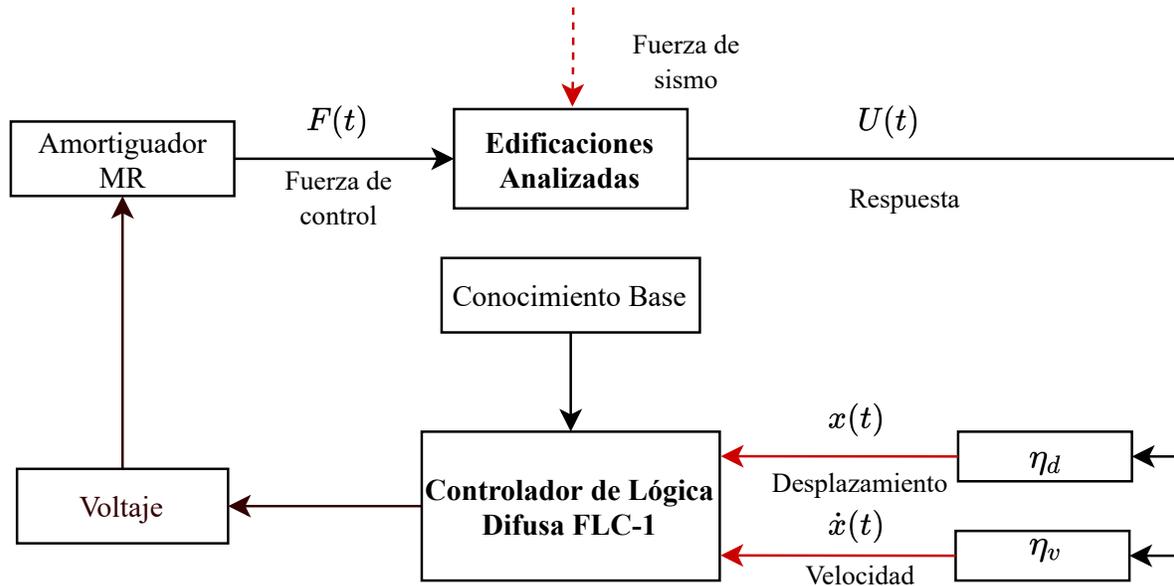


Figura 4.7.: Diagrama de flujo para el sistema de control propuesto (FLC-1)
Modificado de [29]

De acuerdo con lo mencionado en la sección 1.3.1, el sistema de control fue ensayado en una estructura tipo pórtico plano y una estructura tipo pórtico tridimensional, bajo la acción de diferentes aceleraciones de suelo.

4.4.1. Parámetros de entrada y salida del controlador FLC-1

Los parámetros de entrada que se emplearon en el controlador FLC-1 fueron los desplazamientos y las velocidades del primer nivel de piso de las estructuras, mientras que la única variable de salida fue el voltaje requerido por el amortiguador MR para generar las fuerzas de control estructural.

El universo de las funciones de pertinencia para el desplazamiento y la velocidad fueron definidas en el rango $[-1 \ 1]$. En el proceso de fuzzificación de los valores de entrada del controlador, se definieron dos funciones lineales con las cuales se normalizaron los desplazamientos y las velocidades del primer nivel de piso. Estas funciones se presentan en las

ecuaciones (4.14a) y (4.14b):

$$\eta_d = k_d \cdot x \quad (4.14a)$$

$$\eta_v = k_v \cdot \dot{x} \quad (4.14b)$$

Donde η_d y η_v corresponden a los valores de entrada normalizados del universo, para los parámetros de entrada de desplazamiento y velocidad, respectivamente. La variable k_d es el factor de escala del desplazamiento y k_v es el factor de escala para la velocidad. De acuerdo con Liu et al. [11] estos valores se calculan tal y como se indica en las ecuaciones (4.15a) y (4.15b), respectivamente.

$$k_d = \frac{3}{x_{max}} \quad (4.15a)$$

$$k_v = \frac{3}{\dot{x}_{max}} \quad (4.15b)$$

En las ecuaciones citadas en el párrafo anterior, x_{max} y \dot{x}_{max} representan los valores de desplazamiento máximo y velocidad máxima del sistema no controlado y sometido a la acción de una carga dinámica arbitraria, respectivamente.

4.4.2. Definición de las funciones de pertinencia

La geometría de las funciones de pertinencia para los parámetros de entrada y de salida del controlador FLC-1, fueron definidas a través de funciones triangulares semejante a la función de pertinencia que se indica en la ecuación (4.4). Para los parámetros de desplazamiento y velocidad se definieron siete funciones de pertinencia triangulares distribuidas a lo largo del universo $[-1 \ 1]$. Para el caso del parámetro de salida del voltaje, se definieron cuatro funciones triangulares superpuestas en el centro de la base y en el universo $[0 \ 1]$. Las funciones de pertinencia junto con el universo de trabajo, fueron desarrolladas por Liu et al. [11] y adaptadas a los modelos de trabajo desarrollados en esta tesis. A continuación se presentan los esquemas de las funciones de pertinencia de entrada y de salida del controlador.

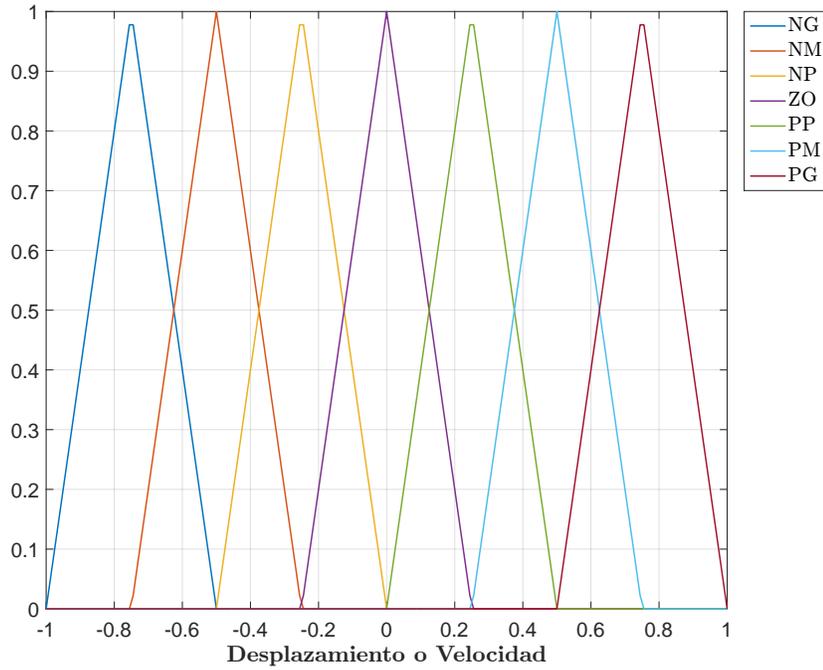


Figura 4.8.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento y velocidad-FLC-1

Fuente: Autor

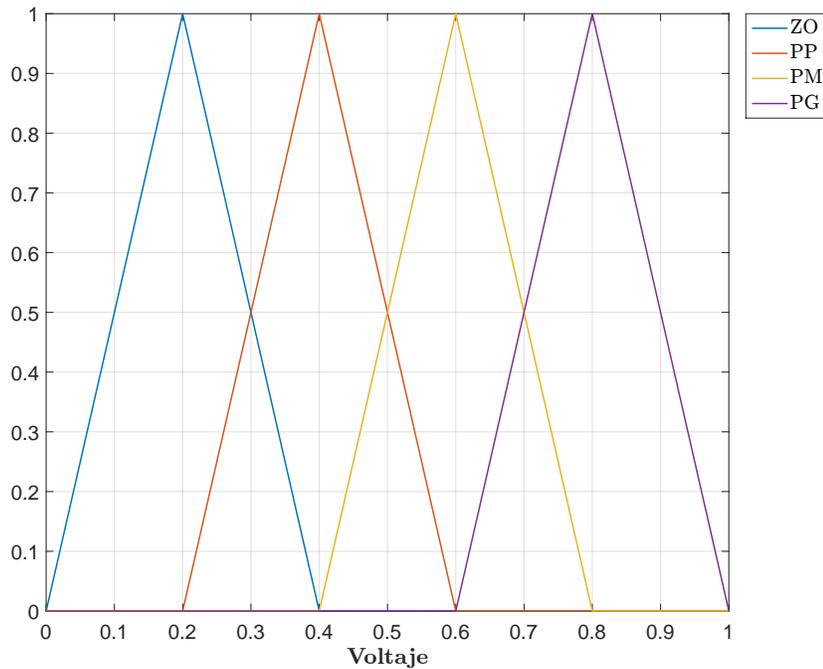


Figura 4.9.: Funciones de pertinencia para el voltaje-FLC-1

Fuente: Autor

Los valores lingüísticos difusos NG, NM, NP, ZO, PP, PM e PG hacen referencia a las si-

güentes convenciones: negativo grande, negativo mediano, negativo pequeño, cero, positivo pequeño, positivo mediano y positivo grande.

El motor de inferencia del controlador se encuentra conectado con la base de conocimientos y su funcionamiento esta ligado al grado de pertinencia del controlador [29].

El principio básico de funcionamiento del sistema de inferencia trabajado por Liu et al. [11, 29], se basa en este concepto: el objeto principal del controlador es mantener a la estructura en una posición neutral. Bajo esta premisa si la estructura está por fuera de su posición de equilibrio y tiende a alejarse de este punto, entonces es necesario aumentar la magnitud del voltaje aplicado. Ésto garantiza el aumento de la capacidad de amortiguamiento de la edificación. Por otra parte, si la estructura se encuentra por fuera del punto de equilibrio y la tendencia es acercarse a éste, entonces se debe disminuir la magnitud del voltaje e incluso no aplicarse debido a que no se requiere.

En la Tabla 4.1 se presenta el conjunto de reglas base con las cuales opera el controlador FLC-1.

Tabla 4.1.: Sistema de inferencia para el controlador FLC-1
Modificado de [98]

Desplazamiento	Velocidad						
	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
NG	PG	PG	PG	PM	ZO	ZO	ZO
NM	PG	PG	PG	PP	ZO	ZO	PP
NP	PG	PG	PG	ZO	ZO	PP	PM
ZO	PG	PM	PP	ZO	PP	PM	PG
PP	PM	PP	ZO	ZO	PG	PG	PG
PM	PP	ZO	ZO	PP	PG	PG	PG
PG	ZO	ZO	ZO	PM	PG	PG	PG

4.4.3. Estrategia de desfuzzificación

La estrategia de desfuzzificación empleada para este controlador corresponde al método del centroide. La forma de aplicación puede consultarse en las ecuaciones (4.8) y (4.9). Con esta formulación, se obtiene el valor del voltaje requerido para una fuerza sísmica arbitraria aplicada sobre la estructura.

Se debe tener en cuenta que la magnitud del voltaje obtenido al finalizar la etapa de desfuzzificación se encuentra definido en el universo difuso $[0 \ 1]$. Se requiere aplicar un factor de escala que permita obtener el valor del voltaje en un universo real definido en el intervalo

[0 10], rango de valores en los que trabajan los amortiguadores MR empleados. Para este estudio se aplicó el mismo factor de escala desarrollado por Lara [29, 99], su formulación se describe en la ecuación (4.16):

$$V = V_{max} \left(\frac{5}{3}s - \frac{1}{3} \right) \quad (4.16)$$

Donde V es la magnitud del voltaje que debe aplicarse al amortiguador MR, V_{max} es el voltaje máximo del dispositivo y s es el valor numérico de salida obtenido por el método del centroide en la etapa final de desfuzzificación.

5. Capítulo 5

Sistema de Control Basado en un GA Tipo NSGA-II Combinado Con Lógica Difusa

En este capítulo se presenta una introducción a las técnicas de programación basadas en algoritmos genéticos. Se destaca su utilidad en la resolución de problemas de optimización multi-objetivo, orientados a mejorar la respuesta estructural de las edificaciones. Se parte de los principios básicos de funcionamiento y modos de operación de estos algoritmos, hasta llegar a la configuración de una metodología que permita diseñar un controlador de lógica difusa, combinado con un algoritmo genético multi-objetivo para administrar fuerzas de control en amortiguadores MR.

5.1. Generalidades

Actualmente, los métodos de control estructural se han convertido en una de las principales herramientas que se han desarrollado para mejorar de forma notable la capacidad de amortiguamiento de diversas tipologías de estructuras, entre las cuales pueden mencionarse: edificaciones [99], puentes [100], plataformas offshore [101], entre otros.

La mayoría de los métodos de diseño de control estructural, se basan en la optimización del rendimiento del sistema mediante la minimización de la energía de control bajo ciertas restricciones y/o la minimización de las cantidades de respuesta de las estructuras [102]. Es así como a diferencia de los métodos de optimización tradicionales, los algoritmos genéticos encuentran de manera eficiente una solución óptima desde un espacio de solución complejo y posiblemente discontinuo [102]. Además, éstos se han aplicado como técnicas efectivas de búsqueda en diversas áreas que involucran el estudio de problemas de optimización altamente no lineales. Ver a modo de ejemplo el trabajo desarrollado por Pourzeynali et al. [103].

En los últimos años, se han presentado grandes avances en aplicaciones basadas en algoritmos genéticos. Schaffer en 1983 [104] incorporó la idea de no dominación. Entre 1989 y 1993,

Goldberg [105] y Fonseca- Fleming [106] utilizaron frentes de Pareto en la optimización de problemas multi-objetivo. Finalmente, en el año 2002 Deb et al. [10] enfocaron sus investigaciones en el mejoramiento de la optimización multi-objetivo.

El desarrollo de una metodología que permita reducir la respuesta estructural en edificaciones utilizando sistemas de control administrados por algoritmos genéticos y combinados con lógica difusa, se convierte en una novedosa alternativa mediante la cual se optimizan los procesos para encontrar soluciones eficientes y económicas, encaminadas a mitigar los efectos adversos en la respuesta dinámica de las estructuras.

5.2. Teoría general de los algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (Genetic Algorithms-GA) forman parte de un grupo de metodologías de programación denominadas metaheurísticas o algoritmos metaheurísticos (Metaheuristic Algorithms). Estos algoritmos en su gran mayoría se inspiran en el proceso de evolución biológica, la modelación de poblaciones tipo enjambres y en las leyes de la física [107].

Los algoritmos metaheurísticos a su vez se dividen en dos grandes grupos: algoritmos de solución única y algoritmos basados en poblaciones. Los algoritmos de solución única emplean una única solución candidata y mejoran dicha solución a través de búsquedas locales [108]. Por otro lado, los algoritmos metaheurísticos basados en poblaciones utilizan múltiples soluciones candidatas durante el proceso de búsqueda, como es el caso de los GA.

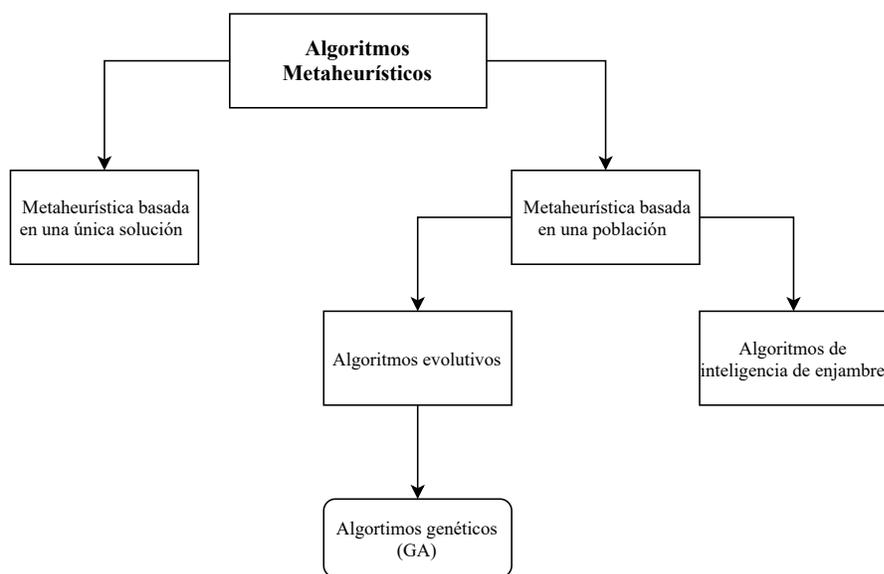


Figura 5.1.: Clasificación de los algoritmos metaheurísticos
Modificado de [108]

En la Figura 5.1 se presenta un esquema de clasificación general de los algoritmos meta-heurísticos, dentro del cual se incluye al grupo de algoritmos genéticos, los cuales son objeto de estudio en este capítulo.

Los algoritmos genéticos se inspiran en el proceso de la evolución biológica, imitando la teoría darwiniana de la supervivencia del más apto en la naturaleza [108]. Dicho de otro modo, los GA son una serie de pasos organizados que describen el proceso que se debe seguir para dar solución a un problema específico. Realizan esencialmente búsquedas aleatorias.

En un sentido más amplio, un algoritmo genético es cualquier población basada en modelos que utilizan operadores de selección, combinación y mutación para la generación de nuevas poblaciones en un espacio de búsqueda que tienen como propósito la optimización de un problema determinado [90].

Los primeros ejemplos de lo que hoy se podría llamar algoritmos genéticos aparecieron a finales de los años 1950, programados en computadoras por biólogos evolutivos que buscaban explícitamente realizar modelos de aspectos de la evolución natural [109]. Para los años de 1960, investigadores como Box [110], Bledsoe [111] y Bremermann [112], desarrollaron de forma independientemente algoritmos inspirados en la evolución para la optimización de funciones y aprendizaje automático.

El siguiente desarrollo importante en el campo vino en 1966 cuando Fogel et al. y Walsh [113] introdujeron una técnica que llamaron programación evolutiva. Posteriormente, en 1975 Holland [114] presenta los principios básicos de los algoritmos genéticos en su obra “Adaptation in Natural and Artificial Systems”. El GA de Holland establece un método para pasar de una población de cromosomas (cadenas de bits que representan individuos o posibles soluciones candidatas de un problema) a una nueva población, empleando operadores de selección, combinación, mutación e inversión [109].

En los últimos años las técnicas de programación basadas en algoritmos genéticos han alcanzado un creciente desarrollo en diversas áreas de estudio. Desde aplicaciones enfocadas en la optimización de materiales compuestos [115], técnicas para el procesamiento de imágenes en radiología [116] y generación de curvas de regresión en ingeniería química [117].

5.3. Estructura básica de un algoritmo genético

La concepción general bajo la cual se rige la operación de un algoritmo genético se fundamenta en un proceso de búsqueda en la población, que utiliza el concepto de supervivencia del más apto [118]. Partiendo de una población inicial, las nuevas generaciones surgen mediante el uso iterativo de operadores genéticos que actúan sobre los individuos presentes en

cada generación. La representación de los cromosomas, la selección, el cruce, la mutación y el cálculo de la función de aptitud son los elementos clave del GA [108].

De acuerdo con Liu [119], la forma mediante la cual opera un GA es la siguiente: se inicia con una población (Y) compuesta por n cromosomas, luego se calcula la aptitud de cada cromosoma en Y . Se seleccionan dos cromosomas C_1 y C_2 de esta población de acuerdo con su aptitud. El operador de cruce (combinación) de un punto con probabilidad de cruce C_p se aplica a C_1 y C_2 para producir una descendencia (O). Luego se aplica el operador de mutación uniforme en la descendencia producida O , con probabilidad de mutación M_p para generar un nuevo descendiente O' . El nuevo descendiente O' se coloca en la nueva población. Las operaciones de selección, cruce y mutación se repiten en la población actual hasta completar la nueva generación de individuos.

En la Figura 5.2 se presenta un diagrama de flujo que resume el modo de operación de un GA típico:

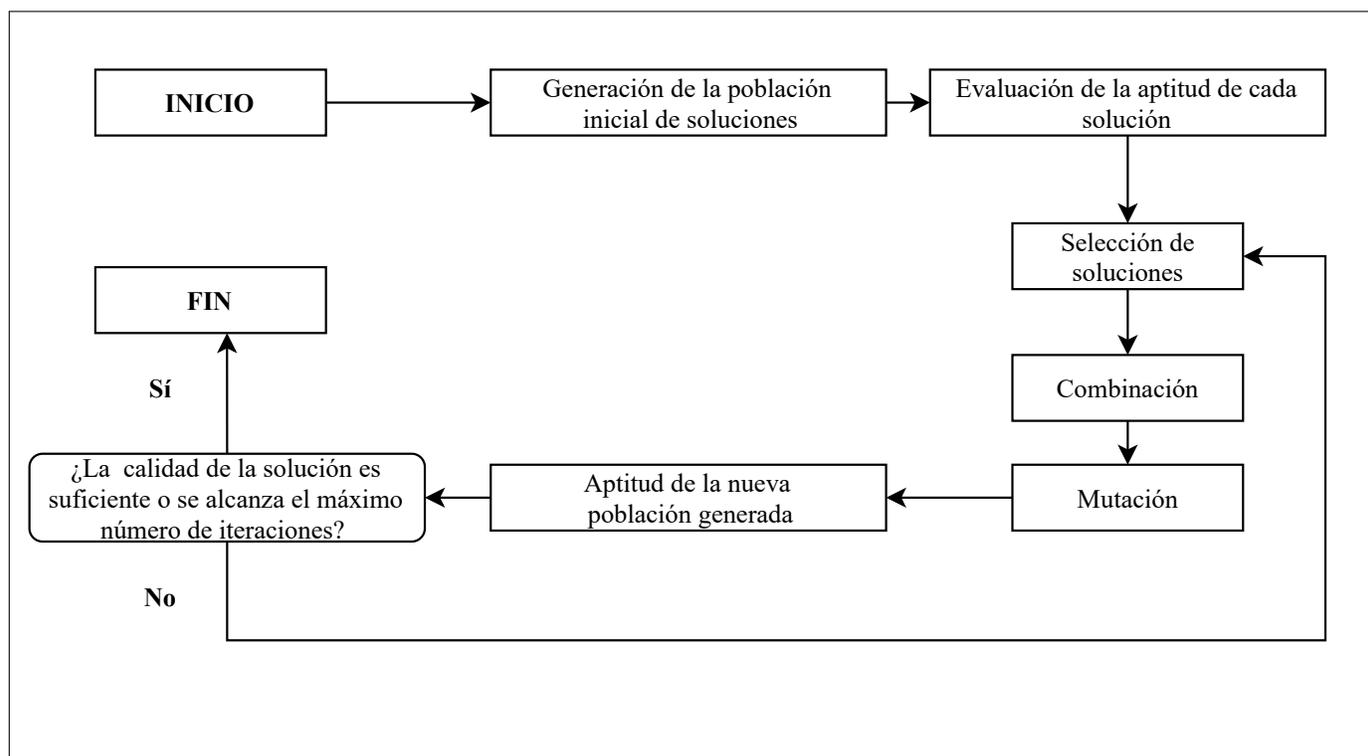


Figura 5.2.: Diagrama de flujo de un GA clásico
Modificado de [120]

5.3.1. Operadores empleados en GA

La Figura 5.3 indica un esquema general de diferentes clases de operadores genéticos que comúnmente se usan en GA.

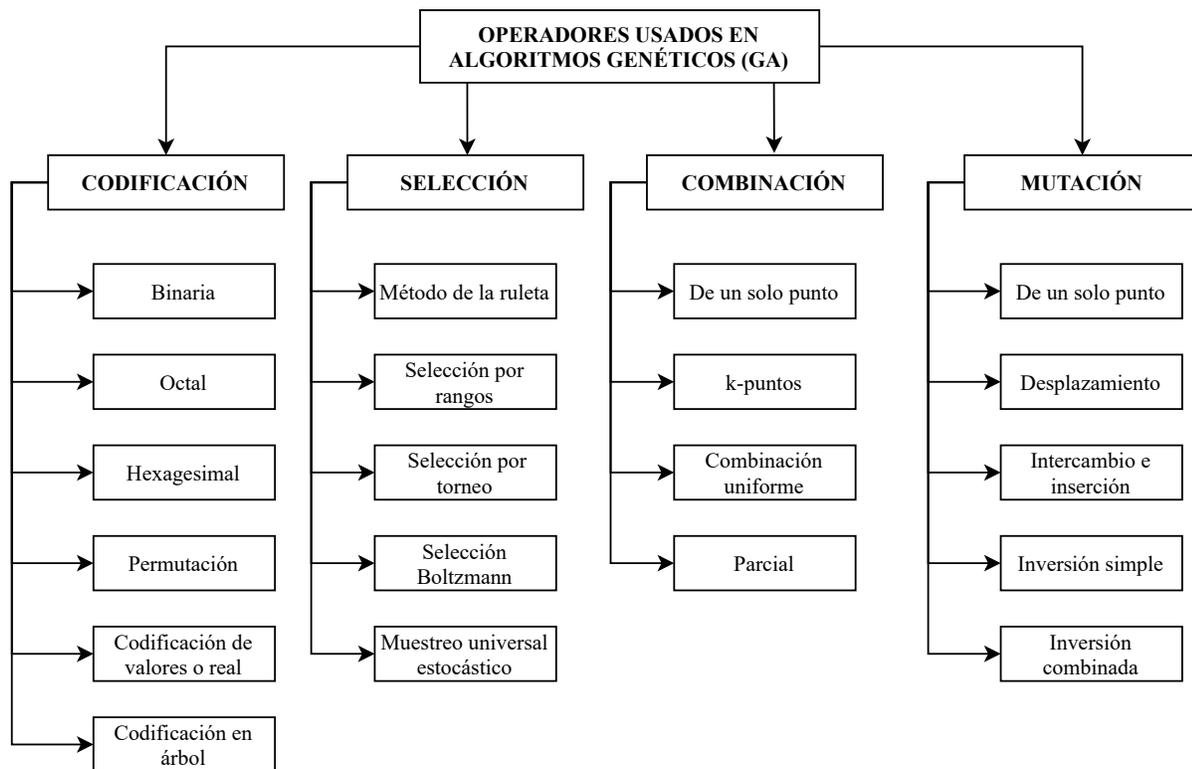


Figura 5.3.: Operadores difusos empleados en GA
Modificado de [108]

5.3.2. Codificación

Los GA funcionan entre el conjunto de soluciones de un problema llamado fenotipo y el conjunto de individuos de una población llamada genotipo, codificando la información de cada solución en una cadena llamada cromosoma [90]. Los símbolos que conforman esta cadena se llaman genes.

El trazado desde el espacio del genotipo al espacio del fenotipo se considera una gran influencia para la realización del GA. Uno de los principales problemas asociados con el trazado de los individuos corresponde a la no factibilidad en la solución del problema [90]. Bajo estas consideraciones se definen dos conceptos importantes en el estudio de los GA:

- **Ilegitimidad:** Se refiere a la condición en la cual la solución decodificada por el cromosoma del GA no representa una solución al problema.

- **Inviabilidad:** Hace referencia a la condición en la cual la solución decodificada por el cromosoma corresponde a un valor que se encuentra por fuera de la región factible del problema.

En la Figura 5.4 se presenta un esquema mediante el cual se da claridad a estos dos conceptos.

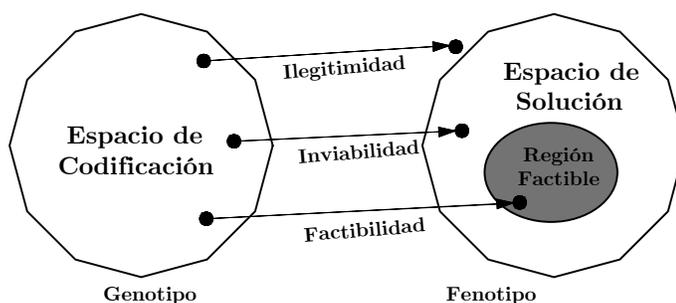


Figura 5.4.: Ilegitimidad e inviabilidad en GA
Modificado de [90]

De otro lado, en el estudio de los sistemas de codificación de un GA es necesario evaluar su efectividad de búsqueda genética [121]. A continuación se presenta algunas propiedades de evaluación definidas por Gen et al. [90]:

Propiedad de no redundancia

Esta propiedad sugiere que el trazado entre las codificaciones y las posibles soluciones debe tener una relación 1-1 idealmente. Sin embargo, pueden existir otras relaciones de clase n a 1 y 1 a n , tal y como se ejemplifica en el esquema de la Figura 5.5 :

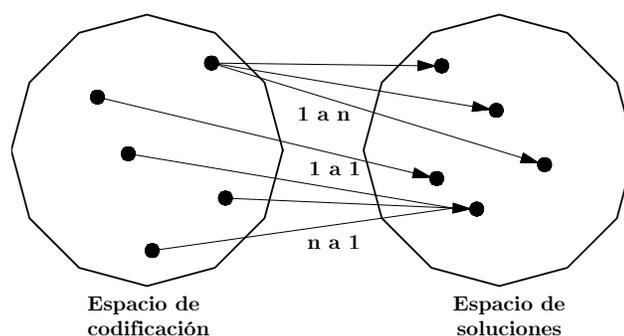


Figura 5.5.: Propiedad de no redundancia en GA
Modificado de [90]

Propiedad de legitimidad

Una permutación de una codificación corresponde a una solución. Esta propiedad garantiza que la mayoría de los operadores genéticos puedan ser aplicados a la codificación.

Propiedad de integridad

Una solución tiene su codificación correspondiente. Esta propiedad garantiza que un punto en el espacio de solución es accesible a una búsqueda genética.

Propiedad de Lamarckian

El significado de los alelos de un gen no depende del contexto. Esta propiedad hace referencia a la cuestión de si un cromosoma puede transmitir sus características a la población futura mediante operaciones genéticas comunes [122].

Propiedad de Casualidad

Pequeñas variaciones en el espacio del genotipo debido a una mutación, implican pequeñas variaciones en el espacio del fenotipo. Esta propiedad fue sugerida por Rechemberg en relación con las estrategias de evolución [123]. Se enfoca en la conservación de las estructuras de vecindad, de modo que la introducción de una nueva información por mutación tenga buenos resultados. El operador de mutación debe preservar la estructura de vecindad en el fenotipo correspondiente [124].

Para la gran mayoría de los programas computacionales, el esquema de codificación resulta ser un aspecto de gran importancia. La información dada debe ser ensamblada en una cadena de bits particular [125]. A continuación se definen los esquemas de codificación más comunes empleados en GA.

- **Codificación binaria:** Es uno de los esquemas de codificación más empleados. Cada gen o cromosoma se representa como una cadena de 1 o 0. Esta condición proporciona una implementación más rápida de los operadores de combinación y mutación [126].
- **Codificación octal:** En este esquema de codificación el gen o cromosoma se representa por una cadena de 8 números arábigos (0 a 7).
- **Codificación hexadecimal:** En este caso el gen o cromosoma se representa mediante un sistema cuya base es 16, 10 números y 6 letras (0-10, A-F).

- **Codificación por permutación:** Esta codificación se emplea generalmente en problemas de ordenación. En este caso el gen o cromosoma se representa a través de una cadena de números que indica la posición en una secuencia [108].
- **Codificación con valores:** Estos valores pueden ser reales, números enteros o caracteres. Su uso es muy frecuente en problemas de optimización de funciones. Se ha demostrado que este sistema es más eficiente que la codificación binaria para la optimización de funciones y para optimizadores con restricciones [127].
- **Codificación en árbol:** En este caso el gen o cromosoma se representa a través de un árbol de funciones o de comandos que pueden relacionarse con cualquier lenguaje de programación [128].

5.3.3. Selección

El operador de selección es considerado de gran importancia en los GA, pues éste determina si un elemento particular de la población participa o no en el proceso de reproducción [108]. A continuación se realiza una breve descripción de las metodologías de selección más comunes:

Método de la ruleta

Este método emplea un procedimiento de análisis estocástico. La idea básica consiste en determinar la probabilidad de supervivencia de un cromosoma en función de su aptitud [129]. El proceso consiste en hacer girar una ruleta tantas veces como existan individuos en la población y en cada iteración se selecciona un sólo cromosoma para la nueva generación.

Dicho de otro modo, la probabilidad de selección p_i de un individuo i , es proporcional a su adaptación relativa [130].

$$p_i = \frac{f(i)}{f_{prom}} \quad (5.1)$$

Donde f_{prom} es la adaptación media de la población.

Inicialmente, el método requiere generar un número aleatorio de acuerdo con la distribución dada para los p_i en un intervalo determinado, por ejemplo [0 1]. Luego el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Se definen las puntuaciones acumuladas q_i según las ecuaciones (5.2a) y (5.2b):

$$q_0 := 0 \quad (5.2a)$$

$$q_i := p_1 + \dots + p_i \quad (\forall i = 1, \dots, n) \quad (5.2b)$$

2. Generar un numero aleatorio $a \in [0 \ 1]$.

3. Se selecciona al individuo i que cumpla:

$$q_{i-1} < a < q_i \quad (5.3)$$

4. Este proceso se repite para cada individuo que se desee seleccionar.

Selección por rangos

La selección por rangos es una forma modificada del método de la ruleta. Este método asigna los valores de la función objetivo a valores reales positivos y la probabilidad de supervivencia de cada cromosoma se determina en función de estos valores [122]. La selección por rangos reduce la posibilidad de que la solución converja de forma prematura.

De acuerdo con Jebari [129] el rango n se otorga al mejor individuo, mientras que al peor individuo se le asigna el rango 1. De esta manera, la probabilidad de que un individuo i sea seleccionada una vez todos los individuos de la población actual hayan sido clasificados está dada por la ecuación (5.4):

$$p(i) = \frac{\text{Rango}(i)}{n(n-1)} \quad (5.4)$$

Donde n representa la cantidad total de individuos de la población.

Selección por torneo

El método de selección por torneo es una variante de la selección por rangos. Consiste en seleccionar de forma aleatoria un conjunto de k individuos, los cuales son clasificados según su aptitud relativa y se selecciona el individuo más apto para su reproducción [129].

Este proceso debe repetirse n veces y la probabilidad de que un individuo sea seleccionado se calcula con la ecuación (5.5):

$$p(i) = \begin{cases} \frac{C_n^{k-1}}{C_n^k} & \text{si } i \in [1, n-k-1] \\ 0 & \text{si } i \in [n-k, n] \end{cases} \quad (5.5)$$

Selección Boltzmann

Este método de selección se basa en los métodos de entropía y muestreo de la distribución Montecarlo y es útil para resolver problemas de convergencia prematura [131].

Muestreo universal estocástico

El método estocástico universal (Stochastic Universal Sampling- SUS), es una variante del método de la ruleta. Se parte de un sólo número aleatorio, a partir de este se generan los k números requeridos y espaciados de igual forma [130]. Los números se calculan de acuerdo con la ecuación (5.6):

$$a_j := \frac{a + j - 1}{k} \quad (\forall_j = 1, \dots, k) \quad (5.6)$$

5.3.4. Combinación

Los operadores de cruce o combinación se utilizan para generar la población descendiente, combinando la información genética de dos o más padres. A continuación se menciona brevemente algunos de los operadores de cruce más comunes:

Combinación de un sólo punto

Representa la forma más sencilla del operador de cruce en algoritmos genéticos. Consiste en seleccionar al azar una única posición en la cadena de ambos padres e intercambiar las partes divididas por dicha posición. Un ejemplo representativo de este operador de combinación se presenta en la Figura 5.6 .

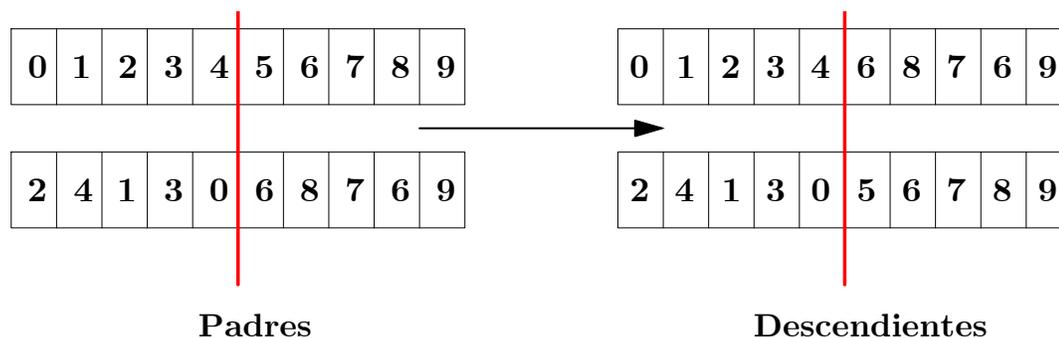


Figura 5.6.: Combinación de un sólo punto
Modificado de [108]

Combinación de k puntos

Este caso corresponde a una variante de la combinación de un sólo punto. Ocurre cuando se seleccionan dos o más puntos de cruce de forma aleatoria en la cadena de ambos padres y se intercambian las partes de acuerdo con los segmentos que se hayan creado. Un ejemplo representativo de esta tipología de combinación se presenta en la Figura 5.7

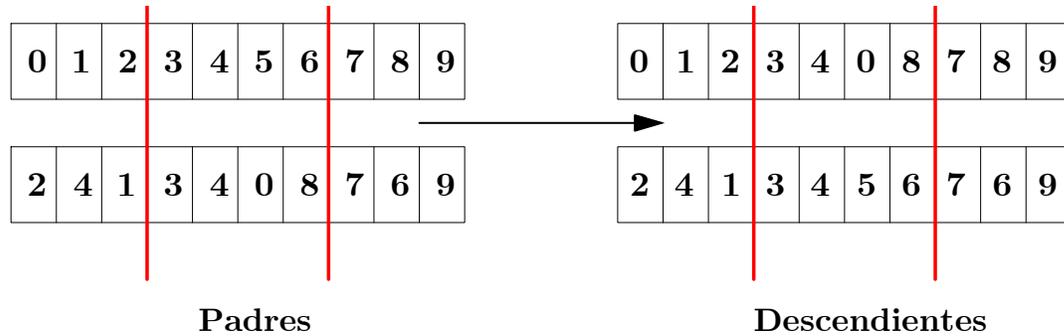


Figura 5.7.: Combinación de k puntos
 Modificado de [108]

Combinación uniforme

En un cruce uniforme el padre no se puede descomponer en segmentos como en los dos casos anteriores. El padre debe ser tratado como un gen por separado y se debe intercambiar el gen con la misma ubicación del otro cromosoma. La Figura 5.8 presenta un intercambio de individuos bajo esta operación.

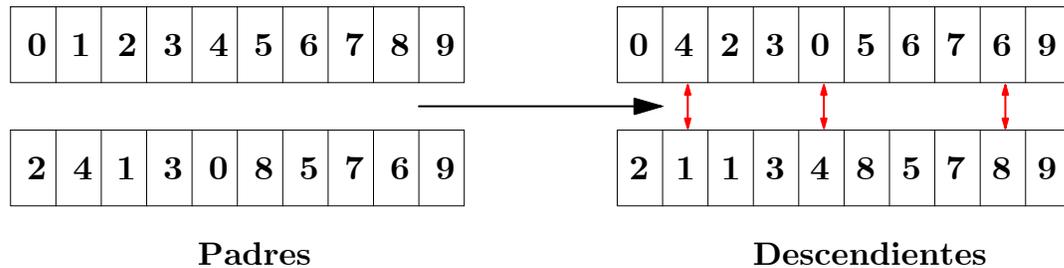


Figura 5.8.: Combinación uniforme
 Modificado de [108]

Combinación parcial

Es una de las operaciones de cruce más empleadas en GA. El modo de funcionamiento es el siguiente: se eligen dos padres para el apareamiento, uno de ellos dona una parte del material

genético y la parte correspondiente del otro progenitor participa en el hijo [132].

Una vez terminado este proceso los alelos faltantes se copian del segundo progenitor [132]. Un ejemplo de esta operación se ilustra en la Figura 5.9

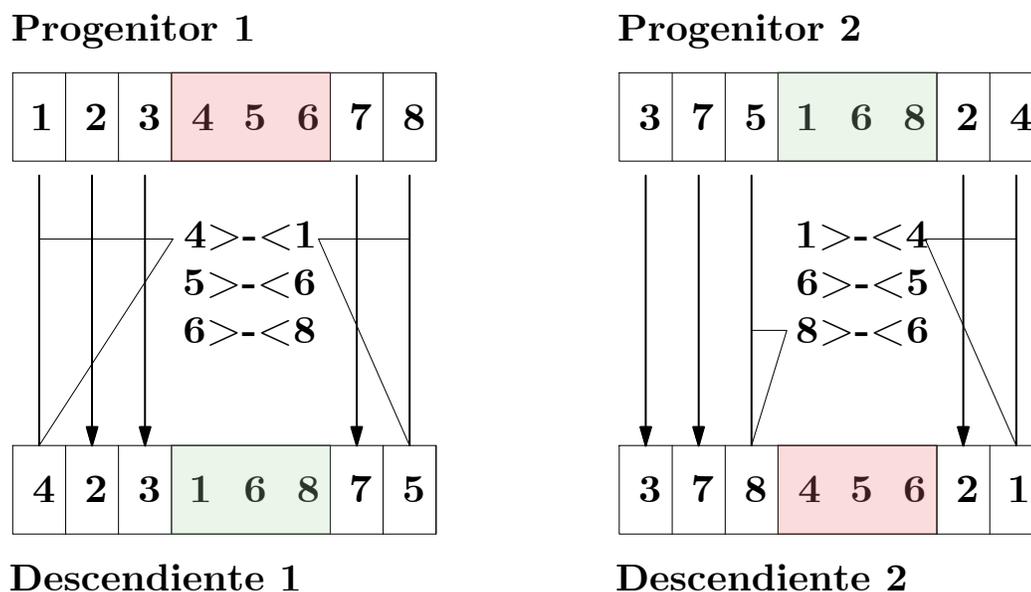


Figura 5.9.: Combinación parcial
Modificado de [108]

5.3.5. Mutación

El operador de mutación en muchas ocasiones produce individuos con una aptitud menor a la de los individuos originales, ya que este operador puede llegar a romper las posibles correlaciones entre genes que se hayan formado durante el proceso evolutivo de la población [130]. Sin embargo, contribuye a mantener la diversidad de la población, evitando que esta entre en un ciclo cerrado que le impida explorar de forma más profunda el rango de posibles soluciones potenciales.

El operador de mutación de un sólo punto, es la forma mas sencilla de la mutación aplicada a un individuo de un GA. Consiste en cambiar aleatoriamente el valor de una de las posiciones de la cadena. En la Figura 5.10 se presenta un ejemplo de una operación de mutación de un sólo punto:

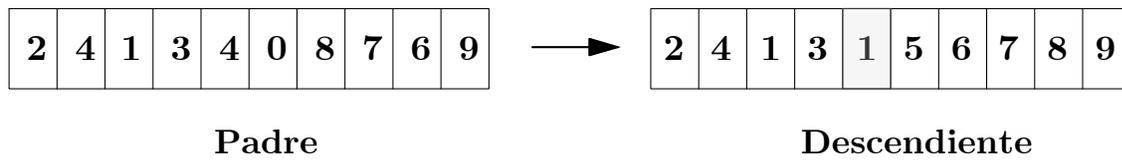


Figura 5.10.: Mutación de un sólo punto
Modificado de [130]

A continuación se definen otros tipos de operadores de mutación comunes en GA:

- **Mutación por desplazamiento:** Desplaza una subcadena de una solución individual dentro de sí misma. La posición de desplazamiento se elige de forma aleatoria.
- **Mutación de intercambio e inserción:** Son variantes de la mutación por desplazamiento. En este caso una parte de la solución individual se intercambia con otra parte o se inserta en otro lugar, respectivamente.
- **Mutación de inversión simple y combinada:** Invierte la subcadena entre dos posiciones específicas en una solución individual. El operador de mutación combinado coloca los elementos en un rango específico de la solución individual de forma aleatoria y comprueba si la aptitud de la solución recién generada mejora [108].

5.4. Algoritmos genéticos multi-objetivo

En ingeniería, existen diversos de problemas para los cuales se hace necesario optimizar más de un parámetro de forma simultánea. Por ejemplo, maximizar la ganancia a la vez que se optimiza el costo de fabricación de un producto o minimizar los desplazamiento relativos de una estructura metálica y reducir las vibraciones de piso, a la vez que se optimiza su costo de fabricación y montaje.

Situaciones como las descritas en el párrafo anterior, se conocen con el nombre de problemas de optimización multi-objetivo (Multiobjective Optimization Problem-MOP). En estos casos debe optimizarse de forma simultanea n funciones, cuyas variables pueden estar sujetas a restricciones. La solución generalmente suele ser compleja, ya que los objetivos entran en conflicto entre ellos y su resolución demanda un gran esfuerzo computacional [133].

Una familia de alternativas que busca dar solución a este tipo de problemas son los Algoritmos Evolutivos Multi-objetivo (Multiobjective Evolutionary Algorithms-MOEA). Los algoritmos MOEA están diseñados para acercarse gradualmente a conjuntos de soluciones

óptimas de Pareto, que están debidamente distribuidas en el frente de Pareto [134].

En un intento de resolver estocásticamente este tipo de problemas, a mediados de la década de 1980 se desarrollaron MOEAs específicos para ser aplicados en el ámbito de los MOP [133]. Desde entonces, el número de publicaciones respecto a esta temática se ha multiplicado por 40 y se han propuesto diversas técnicas de solución [135]. Ver a modo de ejemplo los trabajos desarrollados por Kursawe (1990)[136], Fonseca y Fleming (1993)[137] y Deb et al. (2002) [10].

Definición formal de un problema de optimización multi-objetivo-MOP

A diferencia de los problemas de optimización de un sólo objetivo que pueden llegar a tener una única solución óptima, los MOPs presentan un conjunto incontable de posibles soluciones. Al ser evaluadas producen vectores, sus componentes representan soluciones en el espacio objetivo [133].

Matemáticamente un MOP busca resolver el siguiente problema:

$$\text{Optimizar } f(x) := [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] \quad (5.7)$$

Sujeto a:

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (5.8a)$$

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p, \quad (5.8b)$$

Donde $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ es el vector de las variables de decisión, $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, k$ son las funciones objetivo y $g_i, h_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, p$ son las funciones de restricción del problema.

Definición del concepto de frente de Pareto

El concepto de frente de Pareto debe su nombre a Vilfredo Pareto (1848-1923), un economista italiano quien introdujo el termino en estudios relacionados con eficiencia económica [134]. En algoritmos genéticos este concepto se usa cuando en la toma decisiones de un MOP existen objetivos contradictorios que deben ser definidos en el contexto de sus compensaciones.

Estas compensaciones caracterizan al frente de Pareto, el cual se compone del conjunto de soluciones del MOP en las que la mejora de un objetivo degrada el rendimiento de al menos otro objetivo [138].

Dicho de otro modo, el concepto de frente de Pareto representa al conjunto de soluciones del MOP que no se encuentran dominados entre sí, pero son superiores al resto de soluciones en el espacio de búsqueda.

Lo anterior significa que en los problemas de optimización multi-objetivo, no es posible encontrar una única solución que sea superior a todas las demás soluciones con respecto a todos los objetivos [139].

5.5. Algoritmo genético de clasificación no dominada NSGA-II

Los métodos clásicos de optimización sugieren convertir un problema multi-objetivo en un problema de optimización de un solo objetivo [10]. Existen diversas metodologías que permiten combinar funciones de objetivos múltiples en una sola función de aptitud, como se presenta en la ecuación (5.9):

$$F(x) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (5.9)$$

Donde $F(x)$ es la función de aptitud del MOP, $f_i = 1, \dots, k$ son funciones objetivo del MOP y w_i es el factor de peso asociado a cada función objetivo f_i , que debe cumplir la siguiente restricción:

$$F(x) = \sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (5.10)$$

Esta metodología resulta ser poco eficiente, ya que cuanto se utiliza para encontrar soluciones múltiples se corre el riesgo de que en cada simulación se genere una solución diferente. La necesidad de asignar factores de peso a las funciones objetivo, es un limitante para encontrar una solución óptima en el rango de posibles soluciones potenciales del GA.

Deb et al. [10] propusieron un algoritmo genético multi-objetivo elitista rápido y libre de parámetros, al cual denominaron algoritmo genético de clasificación no dominada (nondominated sorting genetic algorithm NSGA-II). A diferencia de otros algoritmos multi-objetivo, el NSGA-II tiene tres características particulares:

- El NSGA-II es un algoritmo elitista, esta característica le permite conservar hasta el final las mejores soluciones encontradas en iteraciones anteriores.
- Todos los individuos de la población se clasifican de acuerdo con su nivel de no dominancia a través de un procedimiento rápido de ordenación.

- El NSGA-II no requiere un parámetro de ajuste, lo que hace que el algoritmo sea independiente del usuario. [8].

A continuación se presenta el pseudocódigo del NSGA-II desarrollado por Deb et al. [10] en 2002.

Pseudocódigo NSGA-II

Algoritmo 5.1 Algoritmo Genético de Clasificación no Dominada NSGA-II. [134]

```

1: initialize population  $P_0 \subset \chi^\mu$ 
2: while not terminate do
3: {Begin variable}
4:  $Q_t \leftarrow \emptyset$ 
5: for all  $i \in \{1, \dots, \mu\}$  do
6:  $(x^{(1)}, x^{(2)})$  select mates ( $P_t$ ) {select two parent individuals  $x^{(1)} \in P_t$  and  $x^{(2)} \in P_t$ }
7:  $\mathbf{r}_t \leftarrow$  recombine  $(x^{(1)}, x^{(2)})$ 
8:  $q_t \leftarrow$  mutate ( $\mathbf{r}$ )
9:  $Q_t \leftarrow Q_t \cup \{q_t^{(i)}\}$ 
10: end for
11: {End variable}
12: {Selection step, select  $\mu$  – “best” out of  $(P_t \cup Q_t)$  by a two step procedure:}
13:  $(R_1, \dots, R_l) \leftarrow$  non-dom sort(  $\mathbf{f}, P_t \cup Q_t$ )
14: Find the element of the partition,  $R_{i_\mu}$ , for which the sum of the cardinalities  $|R_1| + \dots + |R_{i_\mu}|$  is for the first time  $\geq \mu$ . If  $|R_1| + \dots + |R_{i_\mu}| = \mu$ ,  $P_{t+1} \leftarrow \bigcup_{i=1}^{i_\mu} R_i$ , otherwise determine set  $H$  containing  $\mu - (|R_1| + \dots + |R_{i_\mu-1}|)$  elements from  $R_{i_\mu}$  with the highest crowding distance and  $P_{t+1} \leftarrow (\bigcup_{i=1}^{i_\mu-1} R_i) \cup H$ .
15: {End of selection step.}
16:  $t \leftarrow t + 1$ 
17: end while
18: return  $P_t$ 

```

Modo de operación del NSGA-II

La Figura 5.11 presenta el diagrama de flujo para el modo de operación y funcionamiento del NSGA-II. Teniendo en cuenta esta información y el pseudocódigo del NSGA-II, la metodología a través de la cual opera este algoritmo independiente del tipo de aplicación asociada se resumen en los siguientes pasos:

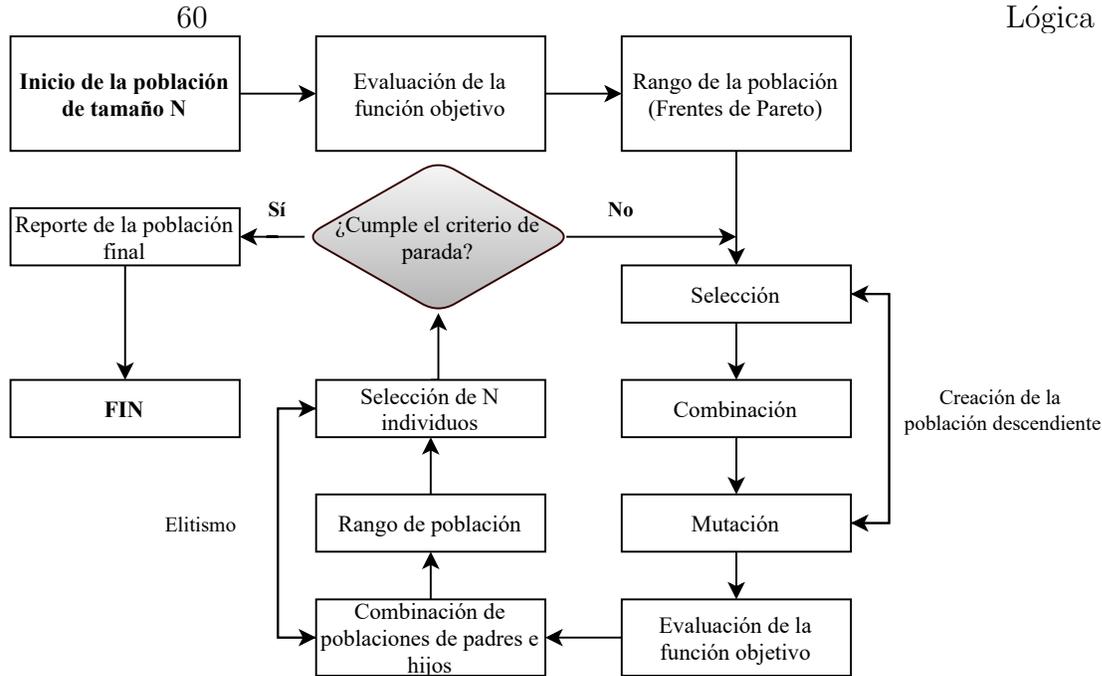


Figura 5.11.: Diagrama de flujo NSGA-II
Modificado de [8]

1. Generar de forma aleatoria una población P de N individuos, la cual corresponde a la primera generación del NSGA-II.
2. Determinar la aptitud de cada individuo para cada uno de los individuos de la primera generación, a través de las funciones objetivos del algoritmo.
3. Ordenar la población según el enfoque de no dominancia (frentes de Pareto).
4. Utilizar operadores genéticos de combinación y/o mutación para generen la población descendiente P' de tamaño N .
5. Calcular la aptitud de la población descendiente.
6. Combinar la población de padres e hijos generando una nueva población de tamaño $2N$.
7. Ordenar nuevamente la población P' según el enfoque de no dominancia (ver Figura 5.12).
8. Seleccionar los frentes de Pareto F_i de mejor rango. Si se supera el tamaño de la población N , se deben eliminar las soluciones que tengan menor distancia de hacinamiento o apilamiento en el último frente seleccionado.

9. Si se cumple el criterio de convergencia o se llega al máximo número de iteraciones se termina el proceso, de lo contrario se debe retornar al paso 4.

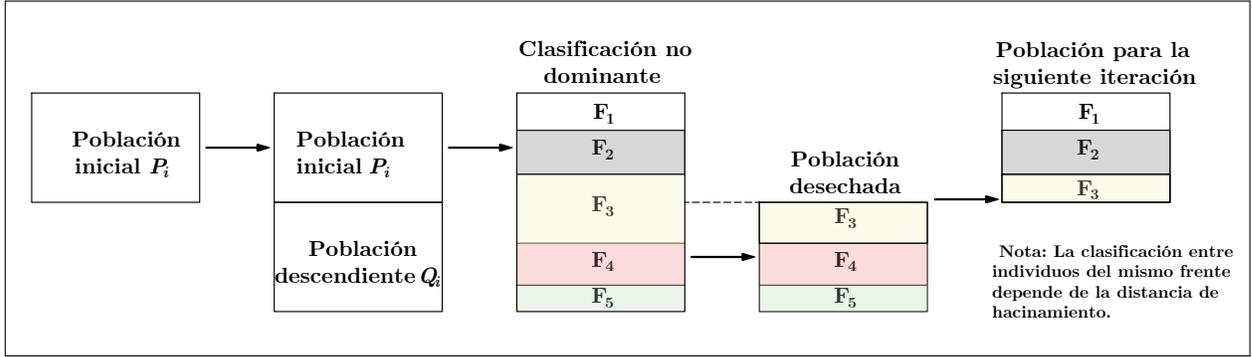


Figura 5.12.: Enfoque del NSGA-II para la generación de nuevas poblaciones
Modificado de [10]

Distancia de hacinamiento

Uno de los objetivos del NSGA-II es encontrar el mayor número de posibles soluciones que pertenezcan al frente del Pareto. La distancia de hacinamiento u operador de apilamiento permite cuantificar el espacio alrededor de una alternativa que no se encuentra ocupada por ninguna otra solución [140]. La distancia de hacinamiento se calcula con el perímetro del cuboide formado por las soluciones vecinas que poseen el mismo rango de dominancia que la alternativa i .

La ecuación (5.11) indica la forma de calcular esta distancia de hacinamiento:

$$d_i = \sum_{m=1}^M \left| \frac{f_m^{I_{i+1}^m} - f_m^{I_{i-1}^m}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right| \quad (5.11)$$

Donde I^m es un vector que representa la alternativa de solución vecina a la alternativa i , f_m^{max} y f_m^{min} son respectivamente, los valores máximos y mínimos sobre todo el espacio de solución de la función objetivo m y M hace referencia al número de funciones objetivo optimizadas.

5.6. Diseño del controlador FLC-2 propuesto

De acuerdo con lo mencionado en el el Capítulo 1, el controlador FLC-2 se construyó mediante la programación de un algoritmo tipo NSGA-II combinado con lógica difusa. Este sistema de control permite optimizar el número de reglas junto con los parámetros de la funciones de membresía del controlador.

En la Figura 5.13 se presenta el diagrama de flujo a través del cual opera el sistema de control desarrollado.

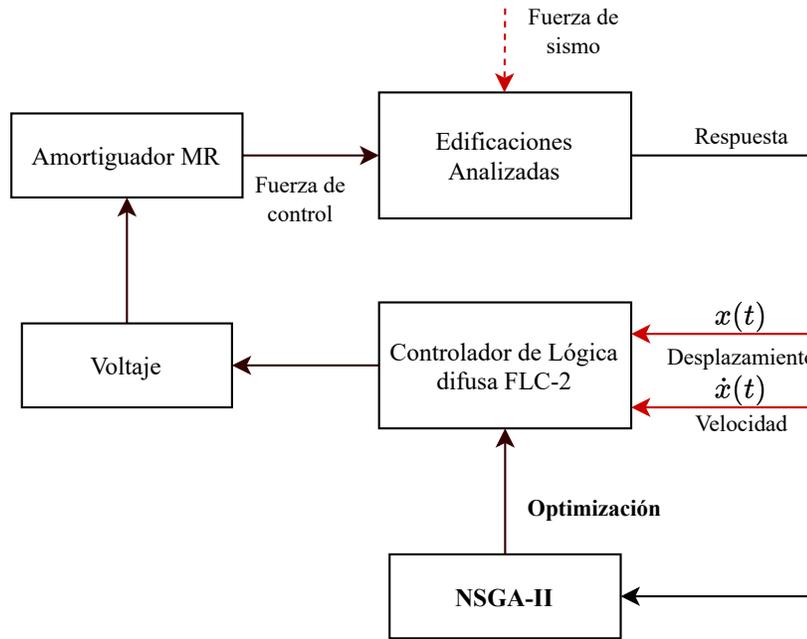


Figura 5.13.: Diagrama de flujo para el controlador FLC-2
Modificado de [8]

5.6.1. Entorno difuso

De forma análoga al procedimiento desarrollado en la sección 4.4 de esta investigación, se emplea un controlador de lógica difusa FLC para operar un amortiguador MR en una edificación tipo pórtico plano y en una edificación tipo pórtico tridimensional. Ambas estructuras se encuentran sometidas bajo la acción de distintas aceleraciones de suelo.

Los parámetros de entrada y de salida empleados en el controlador FLC-2, son los mismos que se utilizaron para el controlador FLC-1 (desplazamientos y velocidades del primer piso como parámetros de entrada y voltaje aplicado al amortiguador MR como único parámetro de salida).

En línea con el principio de funcionamiento de los sistemas de control basados en lógica difusa, el FLC-2 relaciona los parámetros de entrada y de salida utilizando el mecanismo de declaración “si... entonces”, (if...then) conocidos con el nombre de reglas difusas [8]. La primera parte de la regla se denomina antecedente (sí) y la segunda se llama consecuente

(entonces).

La Figura 5.14 presenta un ejemplo del enfoque de interpretación que se le debe dar a estas reglas orientadas de forma específica a los controladores FLC-1 y FLC-2.

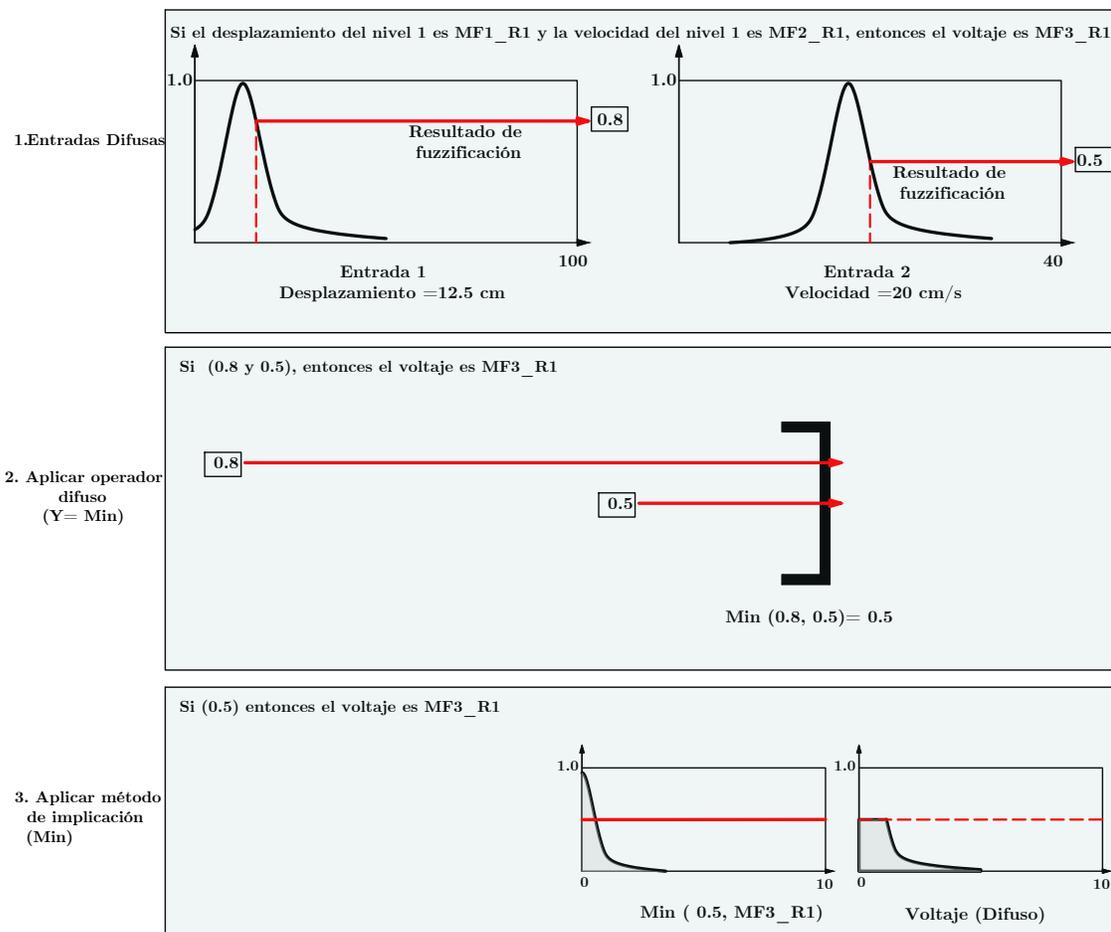


Figura 5.14.: Enfoque de interpretación para una regla difusa
Modificado de [8]

En el ejemplo que se presenta en la Figura 5.14 la interpretación de estas reglas difusas es la siguiente: en primer lugar se evalúa el antecedente, con lo cual se fuzzifican las entradas del controlador (desplazamiento y velocidad). Posteriormente se aplica este resultado al consecuente, proceso que se conoce como implicación.

Las afirmaciones de estas reglas difusas son resueltas en el antecedente con un grado de pertinencia que varía entre 0 y 1.

La regla difusa usada en el ejemplo es la siguiente: si el desplazamiento del primer nivel de la edificación es 12.5 cm (MF1_R1) y la velocidad es de 20 cm/s (MF2_R1), entonces el voltaje aplicado es MF3_R1. Para este caso en particular, a la entrada 1 se le asigna un valor de 0.8 en la regla MF1_R1, mientras que a la entrada 2 se le asigna un valor de 0.5 en la regla MF2_R1.

De esta manera cada entrada se fuzzifica sobre todas las funciones de membresía requeridas por las reglas. Luego de introducir los valores de entrada y fuzzificarlos, se aplica el operador difuso al antecedente y los dos resultados que se obtuvieron (0.5 y 0.8) se convierten en un único valor numérico en el parámetro de salida (0.5), mediante la función del “mínimo (Min.)” para el operador difuso “y”.

Si al antecedente se le asigna un valor inferior a 1, entonces el conjunto difuso de salida se restringe de acuerdo con el método de implicación empleado para la función “mínimo”. Este conjunto difuso posteriormente será defuzzificado asignándole un valor al voltaje de salida.

Por lo general, en una entrada puede estar involucrada más de una regla y esto es una característica del razonamiento difuso [8]. Como caso particular en el diseño del controlador FLC-2 se emplearon 20 reglas de este tipo.

Después de evaluar todas las reglas los resultados se combinan y se defuzzifican de acuerdo con el procedimiento descrito en la Figura 5.15, el cual consta de cinco pasos. Paso 1: Entradas difusas. Paso 2: Aplicar el operador difuso. Paso 3: Aplicar el método de implicación. Paso 4: Agregar todas las salidas. Paso 5: Defuzzificación.

De acuerdo con el ejemplo que se indica en la Figura 5.15, se cuentan con dos reglas difusas. El valor de la entrada 1 (desplazamiento =12.5 cm) se incluye parcialmente en las reglas MF1_R1 y MF1_R2, mientras que el valor de la entrada 2 (velocidad= 20 cm/s) se incluye parcialmente en las reglas MF2_R1 y MF2_R2.

Después de interpretar estas dos reglas utilizando el mecanismo de declaración “si... entonces”, se obtienen dos conjuntos difusos de salida para el voltaje (ver Figura 5.15). Luego, a través de la función “Máximo- (Max)”, estos dos conjuntos se agregan a un único conjunto de salida, el cual se defuzzifica empleando el método del centroide. En consecuencia, el resultado que se obtiene para el parámetro de salida en un universo real; después de haber defuzzificado el conjunto de salida es de 1.3 volts.

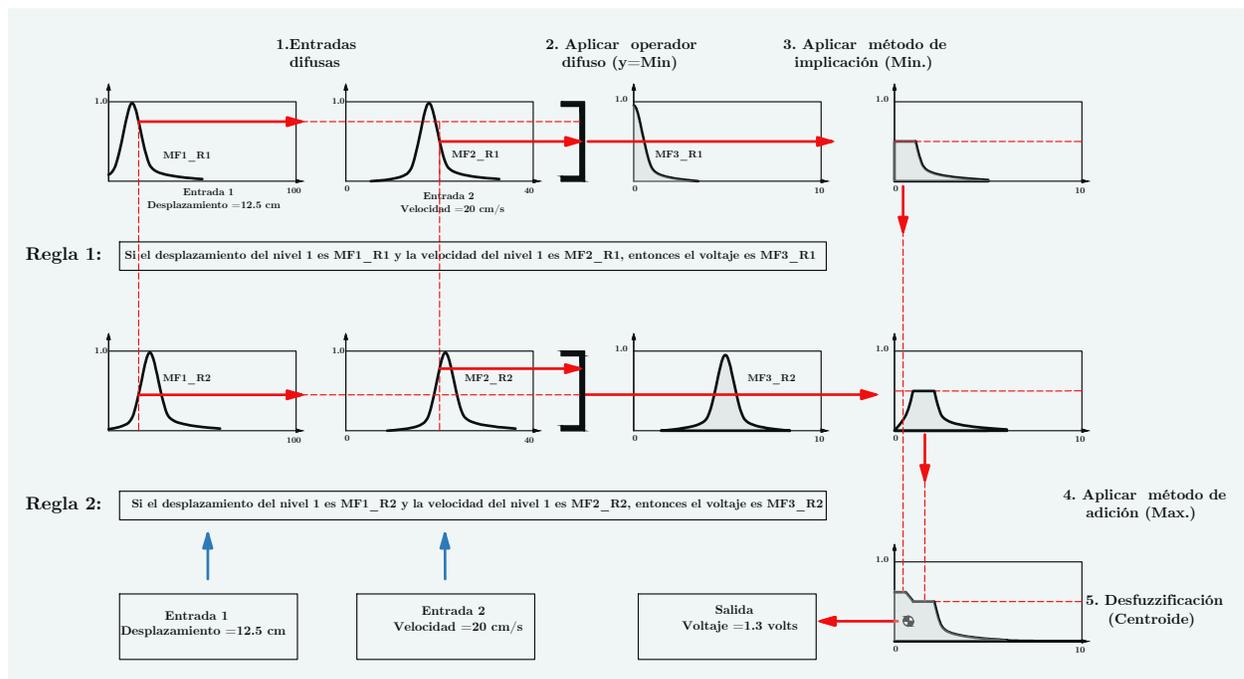


Figura 5.15.: Ejemplo de operación de un FLC genérico
Modificado de [8]

El procedimiento descrito hasta el momento fue aplicado en los controladores FLC-1 y FLC-2, con la diferencia de que en el controlador FLC-1 se emplearon funciones de pertinencia triangulares regidas por parámetros lingüísticos, mientras que el controlador FLC-2 se utilizaron funciones de pertinencia gaussianas cuyos parámetros fueron optimizados mediante el algoritmo NSGA-II.

5.6.2. Optimización del FLC-2 usando el NSGA-II

El algoritmo genético implementado en este caso permite mejorar el desempeño del controlador FLC-2, empleando el procedimiento de optimización descrito en la Figura 5.13.

Todos los parámetros requeridos para optimizar el FLC-2 fueron estructurados mediante la codificación de un cromosoma, el cual está compuesto por los siguientes elementos: 20 reglas difusas tipo gaussianas que fueron evaluadas en paralelo, los valores de aptitud para cada objetivo, el rango y la distancia de hacinamiento asociada a cada cromosoma.

Se emplearon funciones de membresía gaussianas para todos los parámetros de entrada y de salida del controlador, ya que estas pueden aproximarse a casi todos los tipos de funciones de membresía estudiados en la sección 4.3.2, ajustando los valores numéricos de sus parámetros. Como se mencionó anteriormente el esquema de esta función de membresía obedece a la expresión dada en la ecuación 5.12:

$$f(x, a, b) = \exp\left(-\frac{(x - b)^2}{2a^2}\right) \quad (5.12)$$

En este caso b es la media y a la desviación estándar para una función de membresía Gaussiana.

Para evaluar la eficiencia del controlador se emplearon 3 funciones objetivo en ambas estructuras: la respuesta pico de aceleraciones J_1 , el máximo valor RMS de desplazamientos J_2 y la respuesta pico de desplazamientos J_3 . La Tabla 5.1 indica las expresiones mediante las cuales se definieron estos objetivos:

Tabla 5.1.: Funciones objetivo del NSGA-II

Fuente: Autor

Funciones objetivo para el NSGA-II		
Respuesta pico de aceleraciones	Valor RMS máximo de desplazamientos	Respuesta pico de desplazamientos
$J_1 = \frac{\max_{t,i} \ddot{u}(t) }{ \ddot{u}^{max} }$	$J_2 = \frac{\max_{t,i} \text{RMS}(u(t))}{\text{RMS}(u^{max})}$	$J_3 = \frac{\max_{t,i} u(t) }{ u^{max} }$

Donde $u^{max}(t)$ y $\ddot{u}^{max}(t)$ corresponden al valor máximo de desplazamiento y aceleración de la estructura no controlada, respectivamente. Las variables $u(t)$ y $\ddot{u}(t)$ son los valores de desplazamiento y aceleración del sistema controlado y evaluado en el tiempo t , respectivamente.

La respuesta pico de desplazamientos y el valor RMS máximo de desplazamientos, fueron seleccionados como funciones objetivo con el fin de ejercer de forma indirecta un control sobre las derivas de piso. Adicionalmente, las respuestas de los desplazamientos puede entrar en conflicto con las respuestas de las aceleraciones, ya que no necesariamente cuando ocurra la máxima aceleración en la estructura, se va a presentar el máximo desplazamiento de ésta. Por esta razón, se seleccionó la respuesta pico de aceleraciones como otra de las funciones objetivo, de tal forma que esta función pueda mejorar de acuerdo con el desempeño alcanzado por la respuesta pico de desplazamientos.

Los valores de aptitud para cada función objetivo fueron codificados en el cromosoma y se utilizaron para evaluar la eficiencia de cada individuo. Después de ésta evaluación se guardó en la parte final del cromosoma el rango (frente de Pareto) y la distancia de hacinamiento asociada a cada elemento de la población.

La codificación de un cromosoma típico que pertenezca al controlador FLC-2, presenta las características del cromosoma que se ilustra en la Figura 5.16.

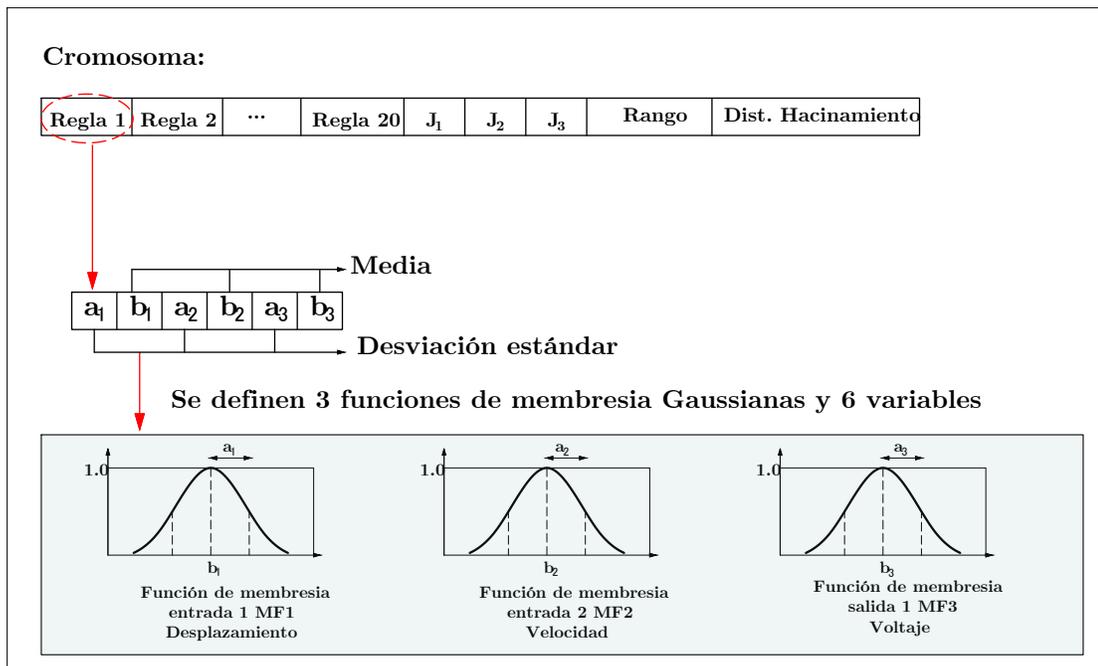


Figura 5.16.: Estructura de codificación de un cromosoma para el controlador FLC-2
Modificado de [8]

El proceso de optimización del FLC-2 a través del NSGA-II , inicia con la generación de una población de tamaño N de forma aleatoria. Ésta población reside dentro de un rango definido por el usuario.

Se evalúa la eficiencia de todos los individuos de la población, se calcula el rango y la distancia de hacinamiento asociada a cada uno de ellos. Después se emplean operadores de combinación y mutación para generar la población descendiente y se evalúa la aptitud de control en cada uno de estos nuevos individuos. Finalmente, se combinan los individuos de la población inicial con los individuos de la población descendiente y se clasifican de acuerdo con el concepto de no dominancia del NSGA-II. Este procedimiento se repite hasta que se cumplan con los criterios de parada del algoritmo o se llegue a un número máximo de generaciones definido por el usuario.

El concepto de no dominancia que usa el NSGA-II para clasificar los individuos de una población se explica a través del esquema que se ilustra en la Figura 5.17. Un conjunto de posibles soluciones ha sido clasificada en tres frentes, (F1, F2 y F3) de acuerdo con su aptitud para optimizar de forma simultanea dos objetivos (Objetivo 1 y Objetivo 2). Cualquier individuo que pertenezca al conjunto de soluciones de F1 optimiza de mejor manera ambos objetivos que una solución que se encuentre contenida en F2 y F3. El grupo de soluciones de F1 domina a F2 y a F3. Es decir, todas las soluciones de F1 son soluciones no dominadas

y forman parte del conjunto de soluciones optimas del frente de Pareto.

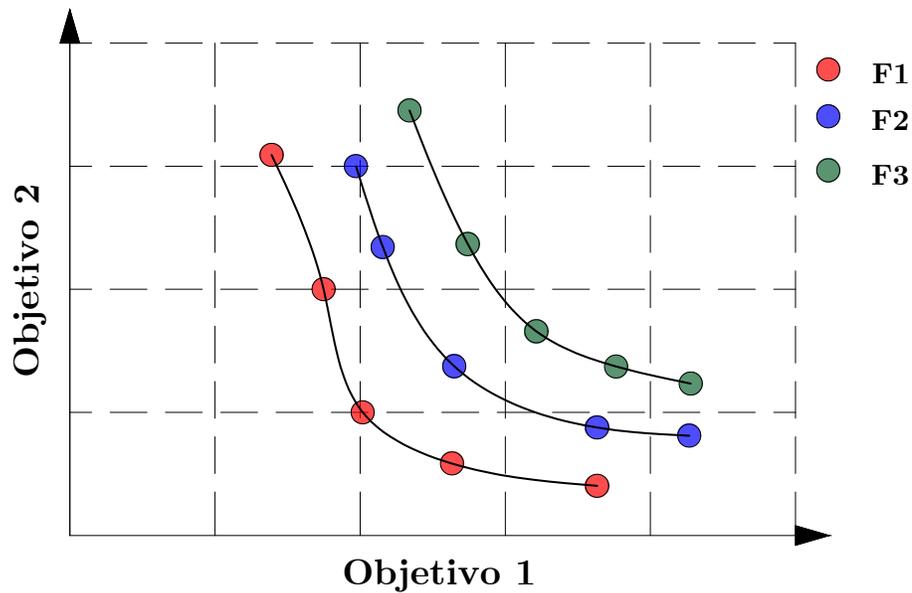


Figura 5.17.: Conjunto de frentes de Pareto

Fuente: Autor

En este estudio el algoritmo NSGA-II orientado a optimizar el desempeño del controlador FLC-2, está compuesto por una población de 50 individuos. Cada elemento fue optimizado durante 100 generaciones con el objeto de mejorar su desempeño. Dicho de otro modo, 50 controladores de lógica difusa fueron optimizados de forma simultanea durante 100 iteraciones para diferentes aceleraciones de suelo.

La codificación de cada individuo está representada por el cromosoma que se indica en la Figura 5.16. Se empleó un radio de combinación $\rho_c = 0.80$ y un radio de mutación $\rho_m = 0.05$. Esto implica que al 80 % de la población se le aplicaron operaciones de combinación y al 5 % de la población operaciones de mutación de forma aleatoria.

6. Capítulo 6

Definición de los Casos de Estudio

En este capítulo se realiza la caracterización de las edificaciones que fueron empleadas para evaluar el desempeño de los controladores FLC-1 y FLC-2. Se definen los registros de aceleraciones utilizadas en el estudio, la metodología de análisis adoptada y la configuración estructural de los modelos numéricos. Adicionalmente, se presentan los parámetros del amortiguador MR que fueron empleados durante las simulaciones.

6.1. Definición de las aceleraciones de suelo

Se definen dos estructuras reales tipo pórtico plano y pórtico tridimensional, las cuales fueron sometidas a la acción dinámica de ocho eventos sísmicos con distintos registros frecuenciales. Estas aceleraciones fueron obtenidas de la base de datos del Center for Engineering Strong Motion Data-CESMD [141]. La Tabla 6.1 provee la caracterización general de estos sismos, mientras que en la Figura 6.1 se ilustran estos registros en el dominio del tiempo. Adicionalmente, en la Figura 6.2 se presentan los espectros de estas aceleraciones en el dominio de la frecuencia, los cuales fueron calculados empleando la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform -FFT).

Tabla 6.1.: Registros de aceleraciones de sismo

Fuente: Autor

Registro	Nombre	Año	Estación	PGA [G]	Duración [s]
1	El Centro	1940	El Centro	0.34	53.7
2	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam	1.16	59.8
3	Loma Prieta	1989	Watsonville	1.2	39.9
4	Petrolia	1992	Cooskie Peak	1.14	60
5	Northridge	1994	Tarzana	1.78	60
6	Kobe	1995	Takatori	0.68	30
7	Nueva Zelanda	2010	Greendale	0.75	150
8	Italia	2016	Forca Canapine	0.93	40

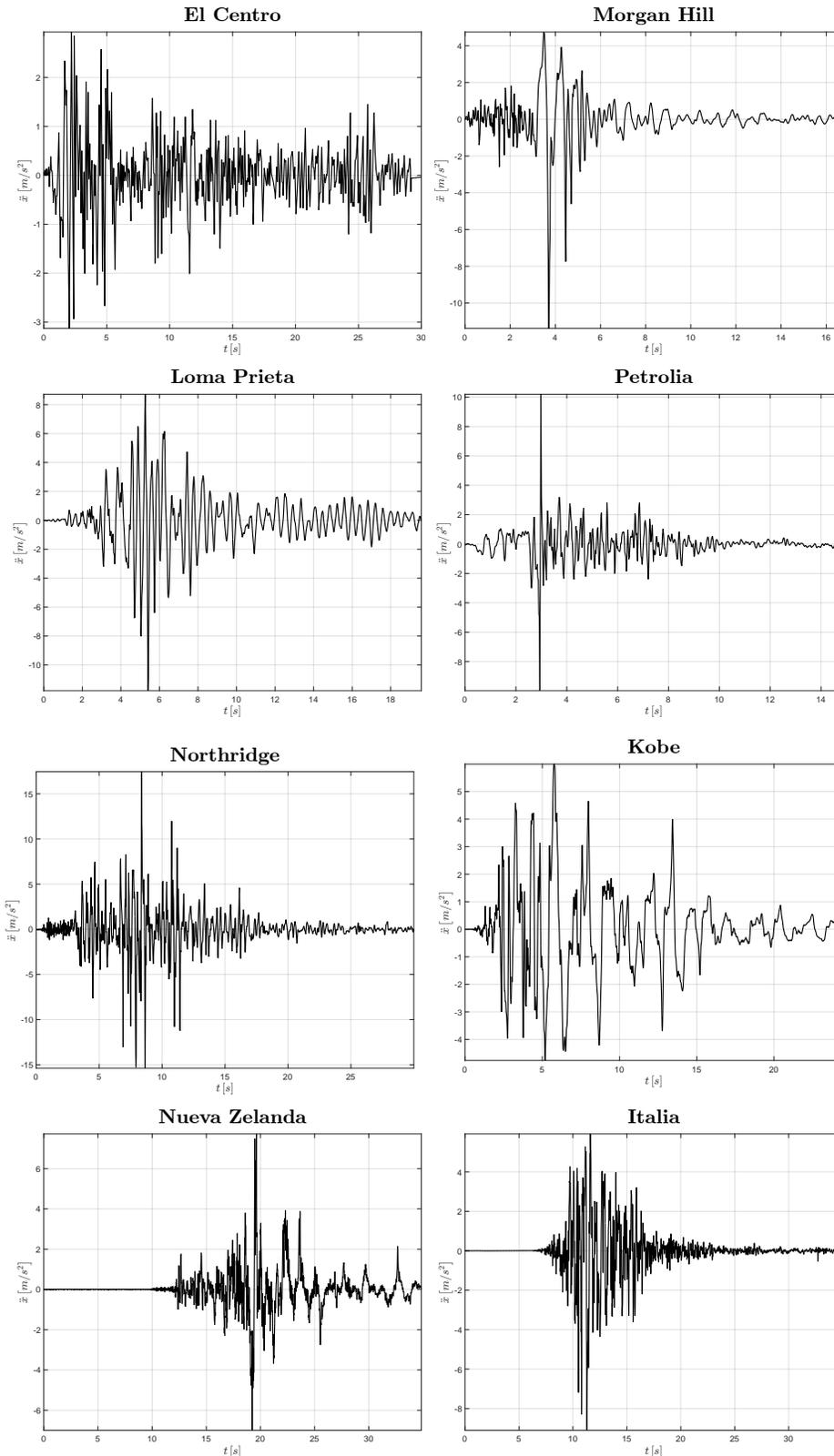


Figura 6.1.: Registros de aceleraciones en el dominio del tiempo
Fuente: Autor

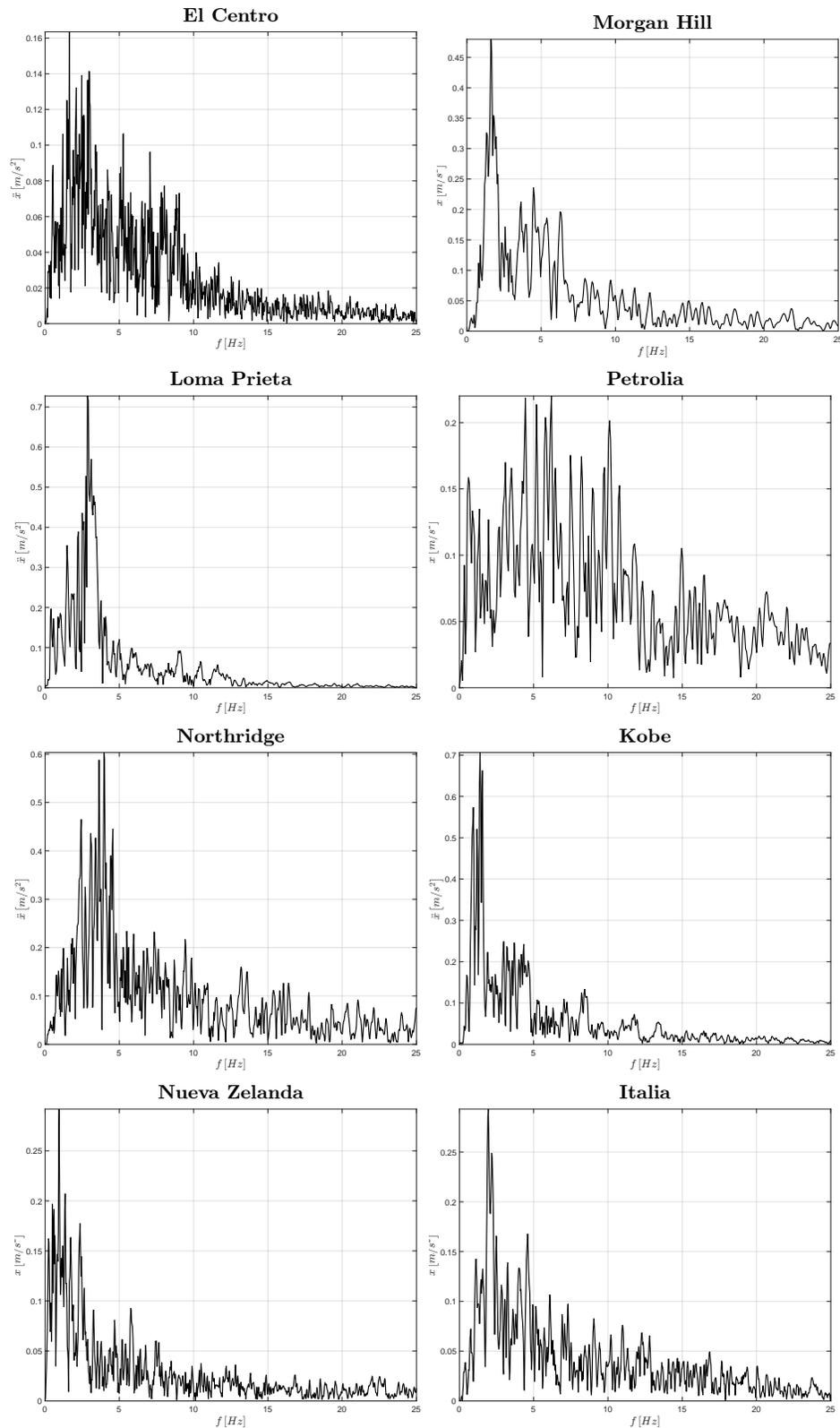


Figura 6.2.: Espectros de aceleraciones en el dominio de la frecuencia -FFT

Fuente: Autor

La Figura 6.3 presenta los espectros de respuesta de aceleraciones para los sismos empleados en esta investigación. De forma complementaria se incluye el espectro de diseño de la NSR-10 para un suelo tipo D, con el objeto de tener un parámetro de comparación entre la magnitud de aceleraciones que se emplearon en el análisis y la magnitud de aceleraciones de un sismo de diseño local de la zona, en donde se encuentran ubicadas las estructuras.

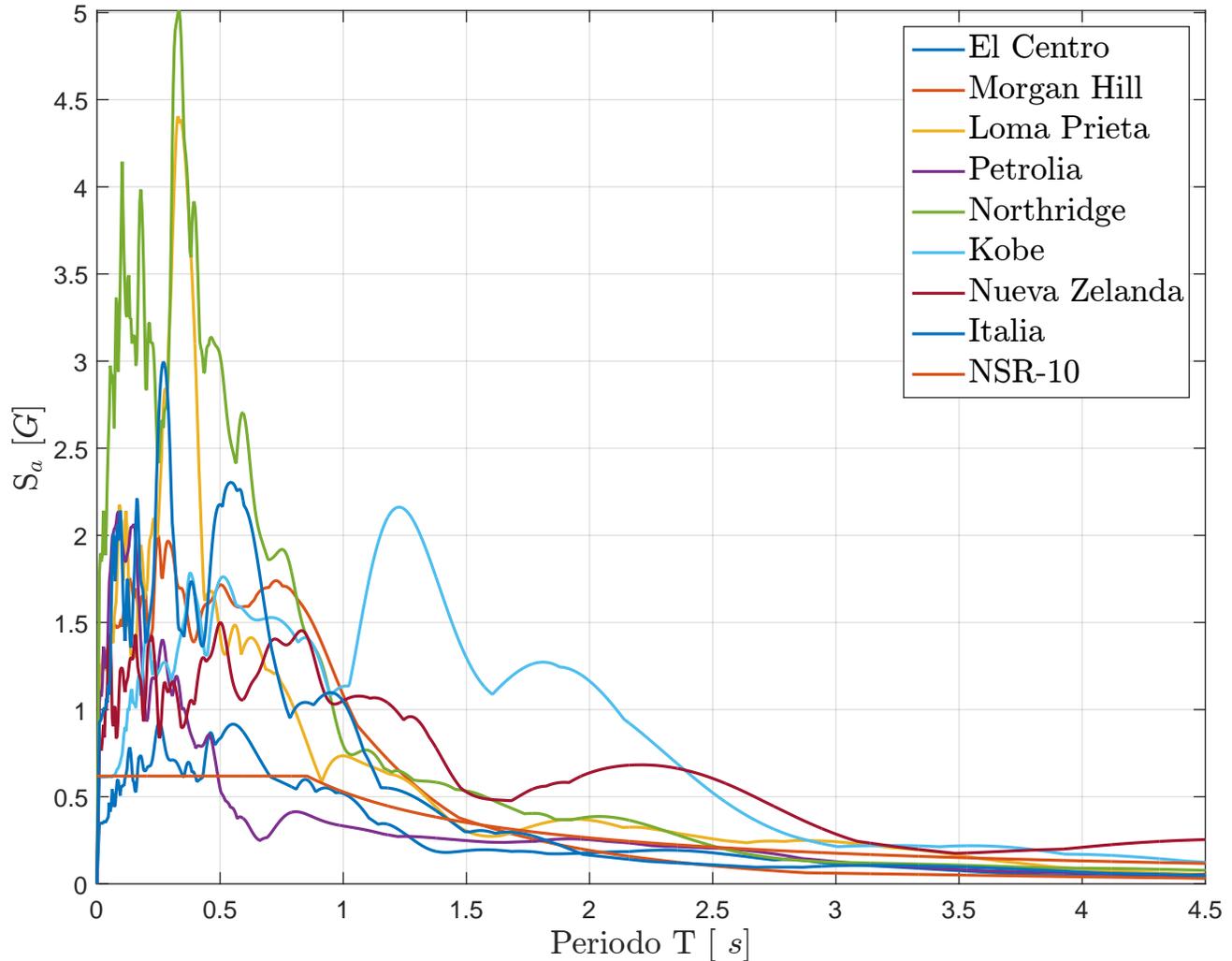


Figura 6.3.: Espectros de respuestas de aceleraciones
Fuente: Autor

6.2. Caracterización de los casos de estudio

En esta tesis se analizaron dos edificaciones reales localizadas en la ciudad de Medellín. Estas estructuras fueron sometidas al grupo de aceleraciones de suelo que se describen en la Tabla 6.1.

En un principio los sistemas de control fueron ensayados en un pórtico plano, para comprender de una forma más simple su mecánica de funcionamiento integrada con el amortiguador MR. Luego, se ensayaron en un pórtico tridimensional con el objeto de evaluar su desempeño bajo unas condiciones de análisis más reales para este tipo de proyectos.

6.2.1. Caso de estudio No. 1

En este caso de estudio se analiza una estructura tipo pórtico plano de 32 niveles de piso y 97 m de altura. La edificación llamada Tierra Grata Bosque Santo se localiza en la ciudad de Medellín. A continuación se describen las características arquitectónicas y estructurales de este sistema.

Configuración arquitectónica

La Figura 6.4 describe la configuración arquitectónica de la edificación (isométrico, vista lateral y vista en planta en donde se señala el pórtico plano que va a ser analizado).

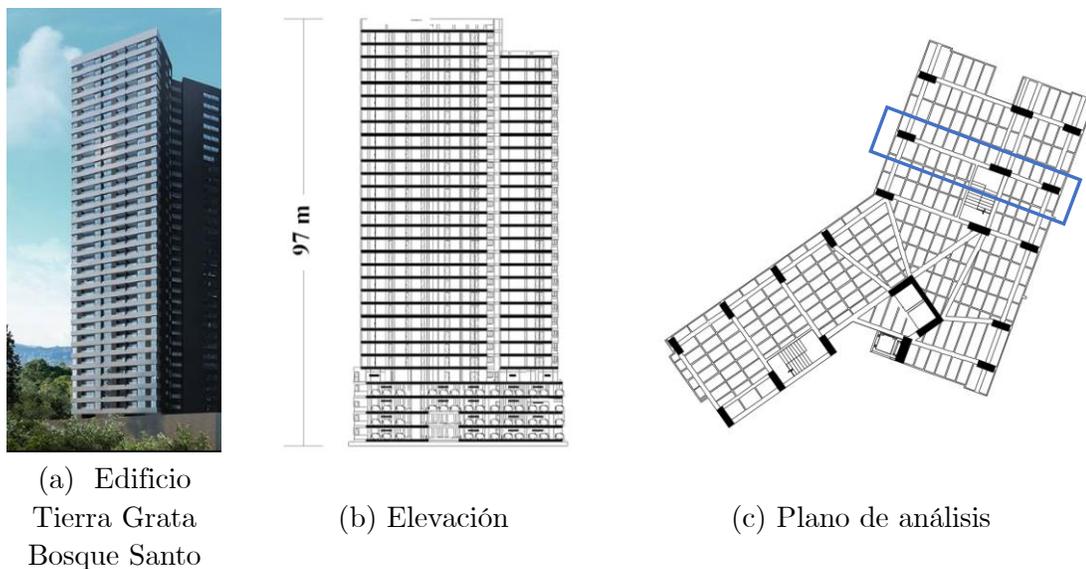


Figura 6.4.: Configuración arquitectónica de la estructura
Modificado de [142]

Formas modales

En la Tabla 6.2 se indican los modos de vibración y frecuencias fundamentales de este caso de estudio. Los resultados fueron obtenidos mediante la modelación numérica del pórtico en el software de diseño Sap2000 V20.0.

Tabla 6.2.: Análisis modal: pórtico plano
Fuente: Propia

Modo	T [s]	f [Hz]	U_x	$\sum U_x$
1	3.885	0.257	0.710	0.710
2	1.126	0.888	0.140	0.860
3	0.561	1.783	0.046	0.900
4	0.352	2.838	0.025	0.930
5	0.243	4.110	0.016	0.950
6	0.177	5.639	0.012	0.960

De la Tabla 6.2 se observa que el 90% de la masa participativa de la estructura se alcanza en el tercer modo de vibración. Las forma deformada de los primeros seis modos se presentan en la Figura 6.5.

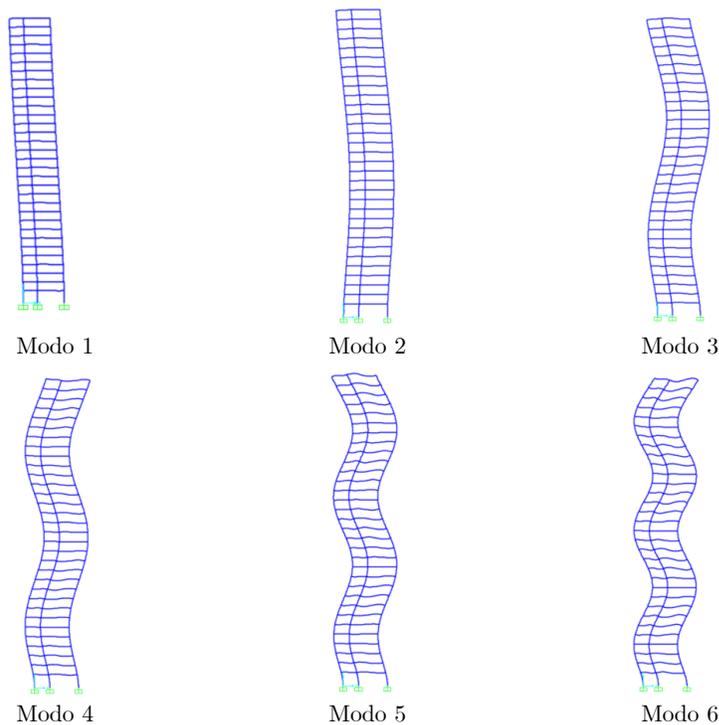


Figura 6.5.: Formas modales del pórtico plano empleado en el caso de estudio No.1
Fuente: Autor

Propiedades mecánicas

La caracterización mecánica de esta estructura se presenta en la figura 6.6

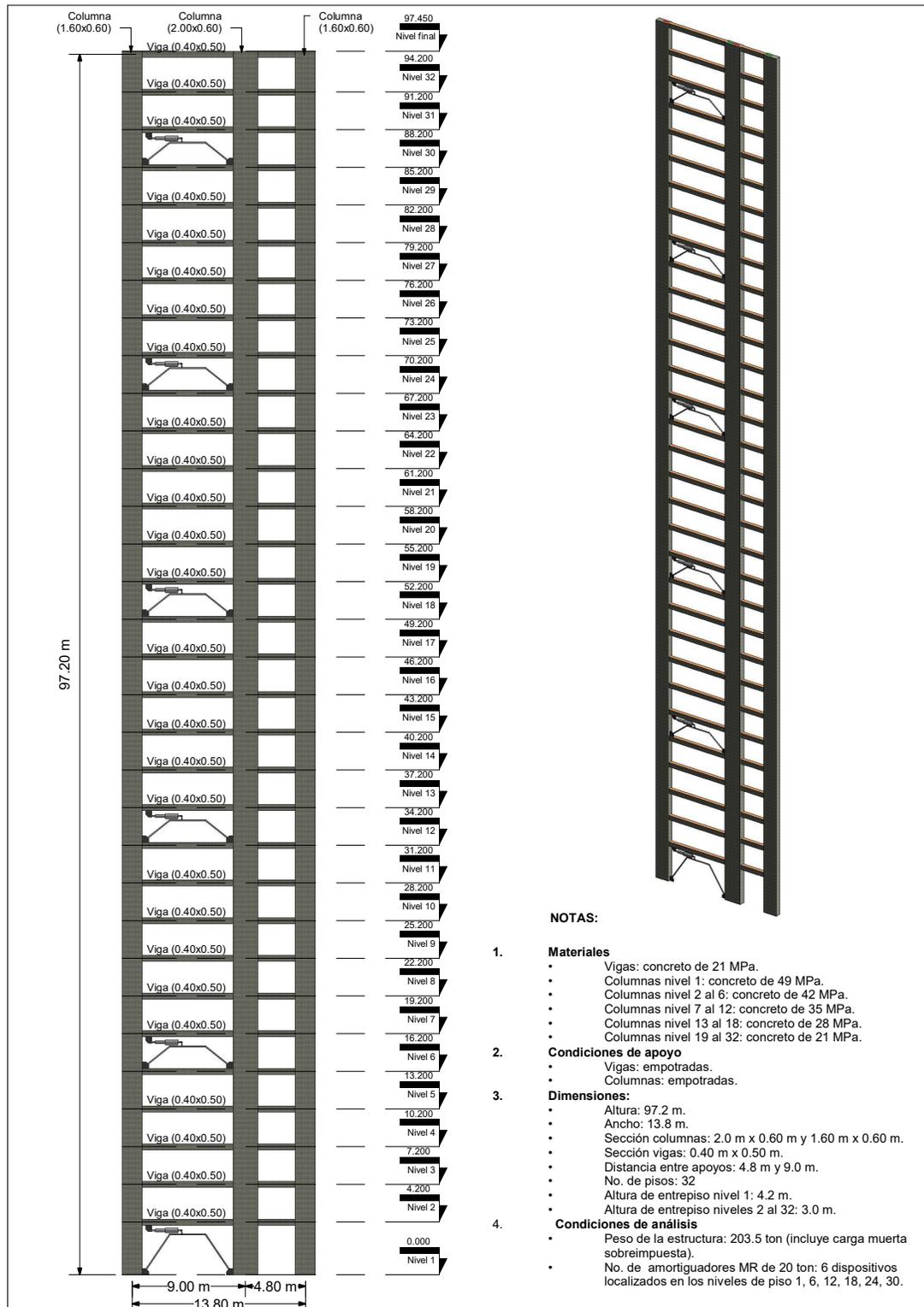


Figura 6.6.: Propiedades mecánicas: caso de estudio No. 1

Fuente: Autor

6.2.2. Caso de estudio No. 2

En este caso de estudio se analiza una estructura tipo pórtico tridimensional de 12 niveles de piso y 39 m de altura. La edificación llamada G-LEVEL es una unidad residencial que va a construirse en la ciudad de Medellín. Para efectos de cálculo solamente se seleccionó un área de estudio específica de la estructura y no se tuvo en cuenta el último piso de la edificación, ya que el aporte sísmico de su masa es irrelevante para el análisis.

Configuración arquitectónica

La Figura 6.7 describe la configuración arquitectónica de la edificación (vista isométrica, vista lateral y vista en planta sobre la cual se indica el área de estudio seleccionada).

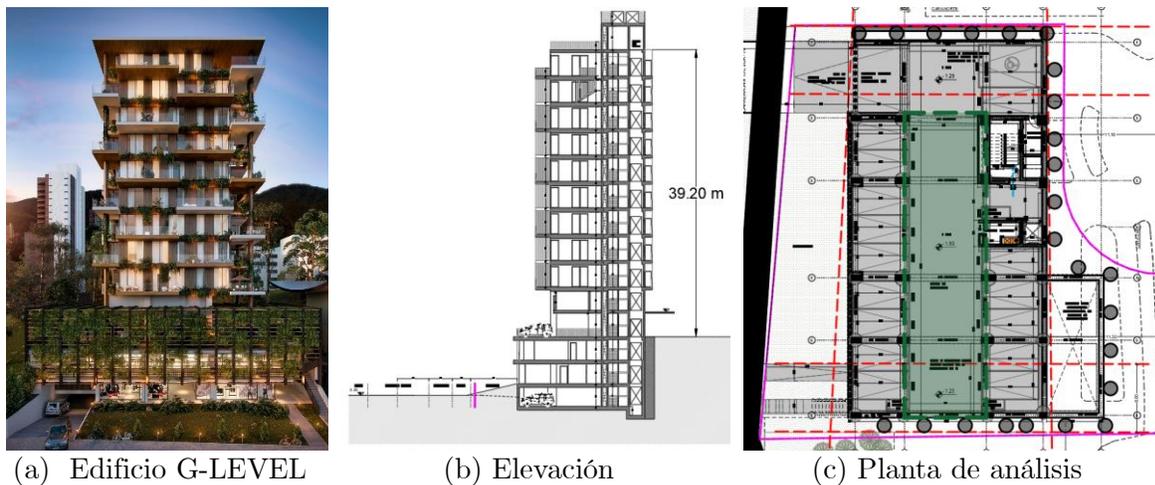


Figura 6.7.: Configuración arquitectónica de la estructura
Fuente: Autor

Formas modales

En la Tabla 6.3 se indican los modos de vibración y frecuencias fundamentales para el pórtico tridimensional. Estos se obtuvieron a partir de la modelación numérica de la estructura en el software de análisis Sap2000 V20.0.

Tabla 6.3.: Análisis modal: pórtico tridimensional

Fuente: Autor

Modo	T [s]	f [Hz]	U_x	U_y	$\sum U_x$	$\sum U_y$
1	1.62	0.62	0.00	0.78	0.00	0.78
2	1.30	0.77	0.68	0.00	0.68	0.78
3	1.23	0.81	0.13	0.00	0.80	0.78
4	0.50	1.99	0.00	0.12	0.80	0.90
5	0.42	2.39	0.10	0.00	0.90	0.90
6	0.39	2.57	0.01	0.00	0.91	0.90

De la Tabla 6.3 se observa que el 90% de la masa participativa de la estructura se alcanza en el quinto modo de vibrar en la dirección del eje X, mientras que en el eje Y este valor se obtiene en el cuarto modo. La Figura 6.8 presenta las forma deformada de estos modos de vibración.

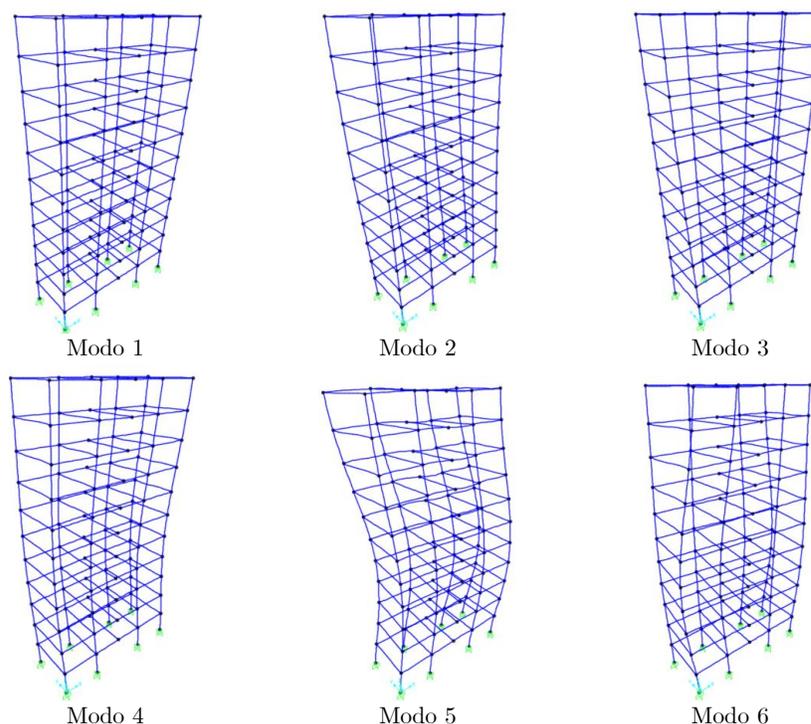


Figura 6.8.: Formas modales del pórtico tridimensional empleado en el caso de estudio No.2

Fuente: Autor

Propiedades mecánicas

La caracterización mecánica de esta estructura se presenta en las Figuras 6.9 y 6.10.

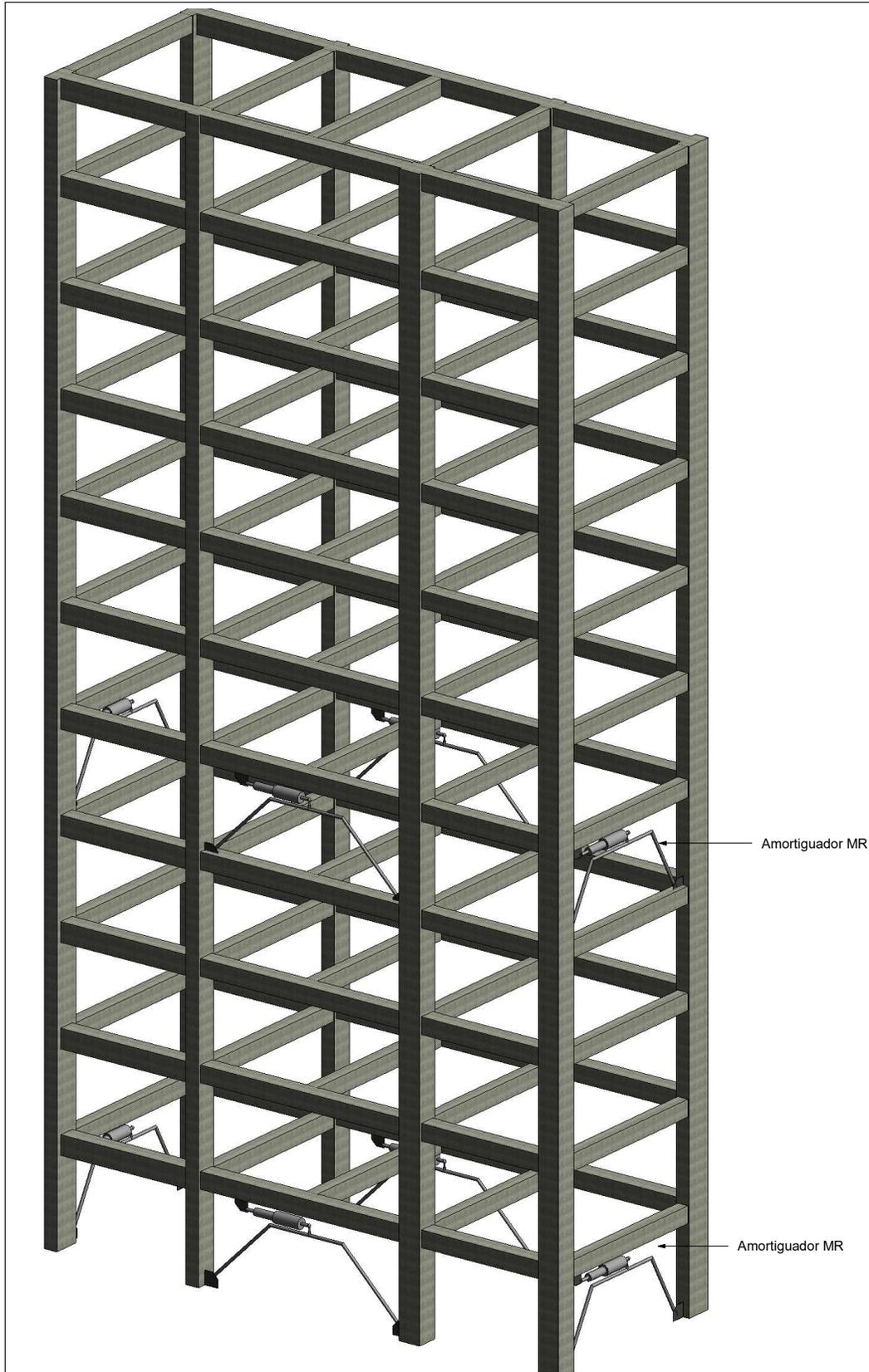


Figura 6.9.: Configuración estructural para el caso de estudio No. 2

Fuente: Autor

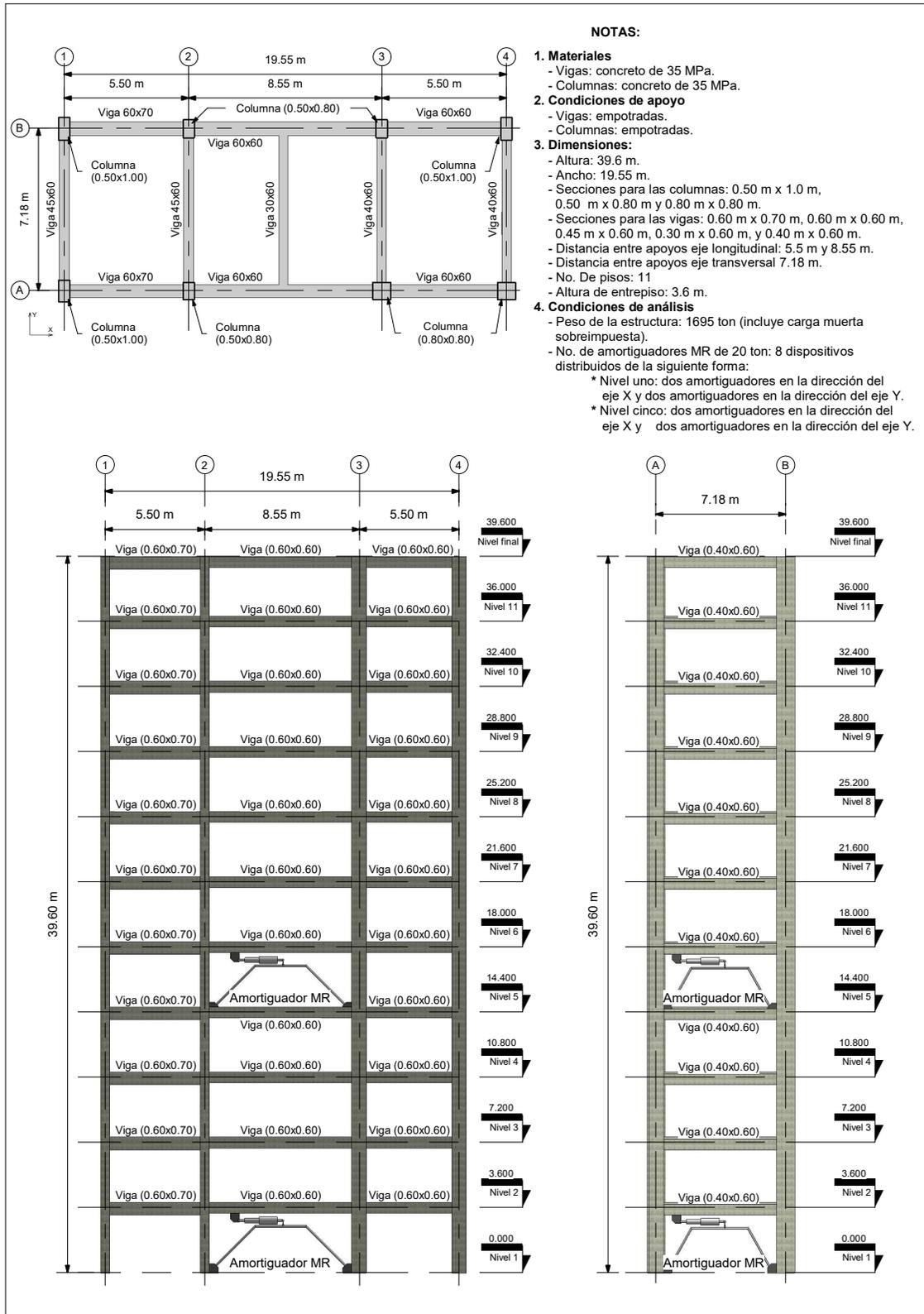


Figura 6.10.: Propiedades mecánicas para el caso de estudio No. 2

Fuente: Autor

6.3. Metodología de análisis estructural

6.3.1. Parámetros de rigidez, masa y amortiguamiento

La expresión que describe el movimiento de una estructura de n grados de libertad, con m dispositivos de control, (amortiguadores MR) sometida a la acción de una carga dinámica de sismo $\mathbf{w}(t) = -M\ddot{x}_g$; con q fuerzas de excitación, está dada por la ecuación (6.1) [143].

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{E}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}F(t) \quad (6.1)$$

Donde $\mathbf{u}(t)$ es el vector de desplazamiento de orden $n \times 1$; \mathbf{M} , \mathbf{C} y \mathbf{K} son matrices de orden $n \times n$ correspondientes a la matriz de masa, matriz de amortiguamiento y matriz de rigidez de la estructura, respectivamente. \mathbf{E} es la matriz de localización de fuerzas externas de orden $n \times q$, $\mathbf{w}(t)$ es un vector de carga de orden $q \times 1$, \ddot{x}_g es la aceleración del sismo, \mathbf{B} es la matriz de localización de las fuerzas de control de orden $n \times 1$ y $F(t)$ es la fuerza de salida del dispositivo MR obtenida del modelo modificado de Bouc-Wen (modelo fenomenológico). Las expresiones para calcular $F(t)$ están dadas en las ecuaciones (3.10) y (3.11).

Las matrices de masa \mathbf{M} y rigidez \mathbf{K} para las estructuras analizadas en este estudio se calcularon mediante el procedimiento de condensación estática descrito por Chopra [144], con el propósito de reducir los grados de libertad (GDL) de los sistemas. De esta forma se generó un grado de libertad por piso para el pórtico plano y tres grados de libertad por piso para el pórtico tridimensional.

La matriz de amortiguamiento \mathbf{C} para ambos casos fue calculada mediante el modelo de amortiguamiento de Rayleigh [145], asumiendo un radio de amortiguamiento para el primer y último modo de las edificaciones equivalente al 5% del amortiguamiento crítico ξ .

La ecuación (6.1) puede ser representada en forma de estado de espacios (ecuación de estado) dando lugar a una ecuación diferencial de primer orden, la cual se presenta en la siguiente expresión:

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}^*\mathbf{z}(t) + \mathbf{E}^*\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}^*F(t) \quad (6.2)$$

Donde:

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad (6.3)$$

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (6.4)$$

$$\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}_{2n \times q} \quad (6.5)$$

$$\mathbf{E}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix}_{2n \times r} \quad (6.6)$$

La matriz \mathbf{A}^* se denomina matriz de estado de transición, mientras que \mathbf{E}^* y \mathbf{B}^* son las matrices de localización de las fuerzas externas y de los controladores respectivamente. Sustituyendo las ecuaciones (6.3), (6.4), (6.5) y (6.6) en la ecuación (6.2), se obtiene la expresión general de espacio estado que describe el comportamiento dinámico de las estructuras analizadas en este estudio.

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \mathbf{w}(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} F(t) \quad (6.7)$$

En los modelos de análisis la ecuación 6.7 fue resuelta a través del método de integración directa Runge-kutta de orden 4 (RK4). Este método está diseñado para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales de primer orden, a través de aproximaciones numéricas de series de Taylor. Un tratado detallado del desarrollo de este método puede ser encontrado en [146].

6.4. Parámetros del amortiguador MR empleados

En la Tabla 6.4 se presentan los parámetros del amortiguador MR empleado en las simulaciones.

Tabla 6.4.: Parámetros del amortiguador MR
Fuente: Modificado de:[100]

Parámetros para el amortiguador MR, según el modelo fenomenológico	
a_a	46.2 kN/m
a_b	41.2 kN/m/V
C_{0a}	110 kN
C_{0b}	114.3 kN
C_{1a}	8359.2 kNs/m
C_{1b}	7482.9 kNs/m/V
k_0	0.002 kN/m
k_1	0.0097 kN/m
γ	164.0 m ⁻²
β	164.0 m ⁻²
A	1107.2
η	2

Estos valores fueron obtenidos con base en un trabajo experimental realizado por Yang et. al. en 2001 [14] para un amortiguador de 20 ton y fueron empleados por Joung Jo. et al.

[100], en el desarrollo de una investigación sobre el control sísmico de puentes atirantados empleando amortiguadores MR.

Para el caso de estudio No. 1 (pórtico plano), se emplearon 6 amortiguadores ubicados en los niveles de piso 1, 6, 18, 24 y 30. Se aplicó el 100% de la fuerza sísmica en la dirección horizontal de la estructura.

Para el caso de estudio No. 2 (pórtico tridimensional), se emplearon 8 amortiguadores MR los cuales fueron distribuidos de la siguiente forma: se aplica el efecto de la fuerza de amortiguamiento de 4 dispositivos en el primer nivel de piso (2 dispositivos orientados sobre eje longitudinal y dos dispositivos orientados sobre el transversal de la estructura) y el efecto de 4 amortiguadores MR en el quinto nivel de piso dispuestos de forma semejante a la distribución adoptada para los dispositivos del primer nivel de piso. La fuerza sísmica fue aplicada a 45° en las dos direcciones principales de la edificación.

Los controladores FLC-1 y FLC-2 fueron desarrollados en el software de programación MATLAB R2015A, mediante la implementación de diferentes subrutinas que fueron sincronizadas con el toolbox FUZZY LOGIC del programa.

7. Capítulo 7

Resultados de las modelaciones numéricas

En este capítulo se presentan los resultados de las modelaciones numéricas que fueron realizadas para las estructuras que son objeto de estudio en esta tesis. Se realiza un análisis genérico del desempeño de los controladores para generar fuerzas de control. Se evidencia que los sistemas FLC-1 y FLC-2 mejoran significativamente el desempeño y la respuesta estructural de estas edificaciones.

7.1. Caso de estudio No. 1

En el caso de estudio No. 1 se analiza el pórtico plano de 32 niveles caracterizado en la sección 6.2.1. Este pórtico fue ensayado con las 8 aceleraciones de sismo que se describieron en la Tabla 6.1 y su función de respuesta fue optimizada con los controladores FLC-1 y FLC-2.

Los mejores resultados de optimización para las simulaciones realizadas con los controladores, se obtuvieron para el sismo de Kobe. La sección 7.1.1 presenta un análisis detallado de estos resultados. En la sección 7.1.2 se realiza un análisis global para los otros registros de aceleraciones, en el cual se compara la eficiencia de los controladores FLC-1 y FLC-2.

7.1.1. Análisis para el sismo de Kobe

La tabla 7.1 indica los índices finales de desempeño, el rango R_i y la distancia de hacinamiento H de cada individuo P_i optimizado por el NSGA-II para el sismo de Kobe. En este análisis se seleccionó el sistema de inferencia generado por el individuo P_1 de esta población, ya que es el elemento con la mayor distancia de hacinamiento. Todos los individuos de esta población fueron clasificados por el GA en el rango No. 1.

Tabla 7.1.: Resultados generados por el NSGA-II para el sismo de Kobe
Fuente: Autor

P_i	J_1	J_2	J_3	R_i	H	P_i	J_1	J_2	J_3	R_i	H
1	0.480	0.442	0.567	1	0.051	26	0.495	0.440	0.588	1	0.000
2	0.486	0.441	0.560	1	0.032	27	0.486	0.441	0.560	1	0.000
3	0.477	0.462	0.609	1	0.005	28	0.485	0.441	0.562	1	0.000
4	0.485	0.441	0.562	1	0.004	29	0.477	0.462	0.609	1	0.000
5	0.477	0.462	0.609	1	0.003	30	0.477	0.462	0.609	1	0.000
6	0.494	0.439	0.589	1	0.003	31	0.485	0.441	0.562	1	0.000
7	0.477	0.462	0.609	1	0.001	32	0.477	0.462	0.609	1	0.000
8	0.484	0.432	0.625	1	0.000	33	0.495	0.440	0.588	1	0.000
9	0.494	0.439	0.588	1	0.000	34	0.486	0.441	0.560	1	0.000
10	0.480	0.443	0.567	1	0.000	35	0.476	0.455	0.644	1	0.000
11	0.495	0.440	0.588	1	0.000	36	0.480	0.443	0.567	1	0.000
12	0.477	0.462	0.609	1	0.000	37	0.477	0.462	0.609	1	0.000
13	0.477	0.462	0.609	1	0.000	38	0.485	0.441	0.562	1	0.000
14	0.478	0.442	0.571	1	0.000	39	0.485	0.441	0.558	1	0.000
15	0.478	0.452	0.620	1	0.000	40	0.485	0.441	0.562	1	0.000
16	0.480	0.443	0.567	1	0.000	41	0.494	0.439	0.588	1	0.000
17	0.485	0.441	0.562	1	0.000	42	0.485	0.441	0.562	1	0.000
18	0.486	0.441	0.560	1	0.000	43	0.484	0.432	0.625	1	0.000
19	0.480	0.443	0.567	1	0.000	44	0.477	0.454	0.642	1	0.000
20	0.477	0.462	0.609	1	0.000	45	0.495	0.431	0.642	1	0.000
21	0.485	0.441	0.562	1	0.000	46	0.485	0.441	0.558	1	0.000
22	0.494	0.439	0.588	1	0.000	47	0.480	0.443	0.567	1	0.000
23	0.485	0.441	0.562	1	0.000	48	0.482	0.436	0.622	1	0.000
24	0.495	0.440	0.588	1	0.000	49	0.477	0.462	0.609	1	0.000
25	0.477	0.462	0.609	1	0.000	50	0.477	0.462	0.609	1	0.000

Las funciones de pertinencia determinadas para el individuo P_1 se presentan gráficamente en las Figuras 7.1, 7.2 y 7.3.

Las Figuras 7.1 y 7.2 indican las funciones para los parámetros de entrada de desplazamiento y velocidad respectivamente. La Figura 7.3 representa las funciones de pertinencia para la variable de salida del voltaje.

La representación de estas curvas obedece al esquema de funciones de pertinencia o de membresía tipo Gaussianas, caracterizadas por los parámetros a_i , b_i de la ecuación 5.12.

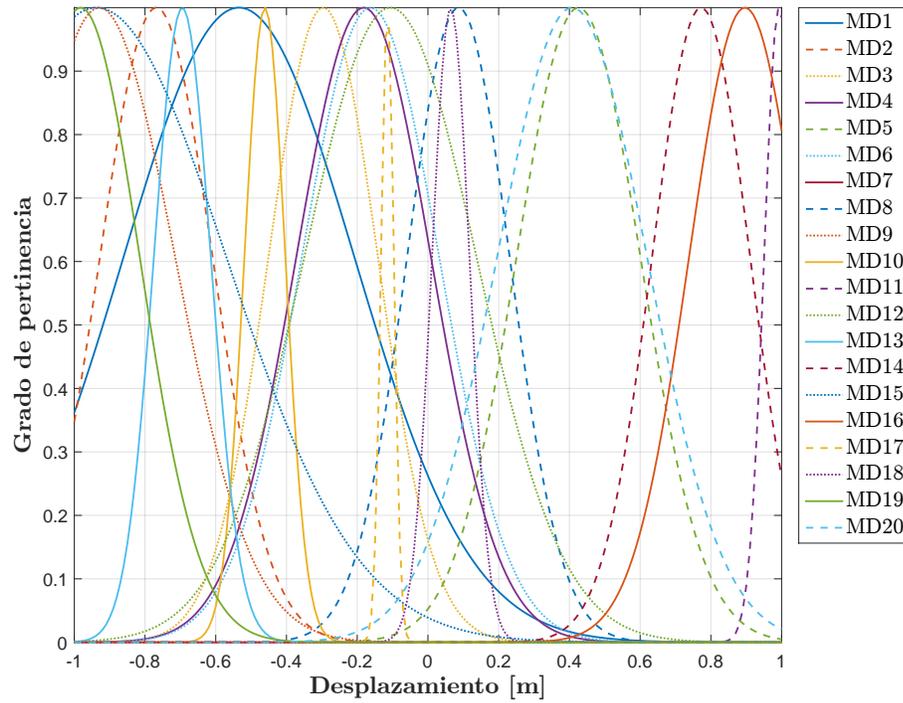


Figura 7.1.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-FLC-2
Fuente: Autor

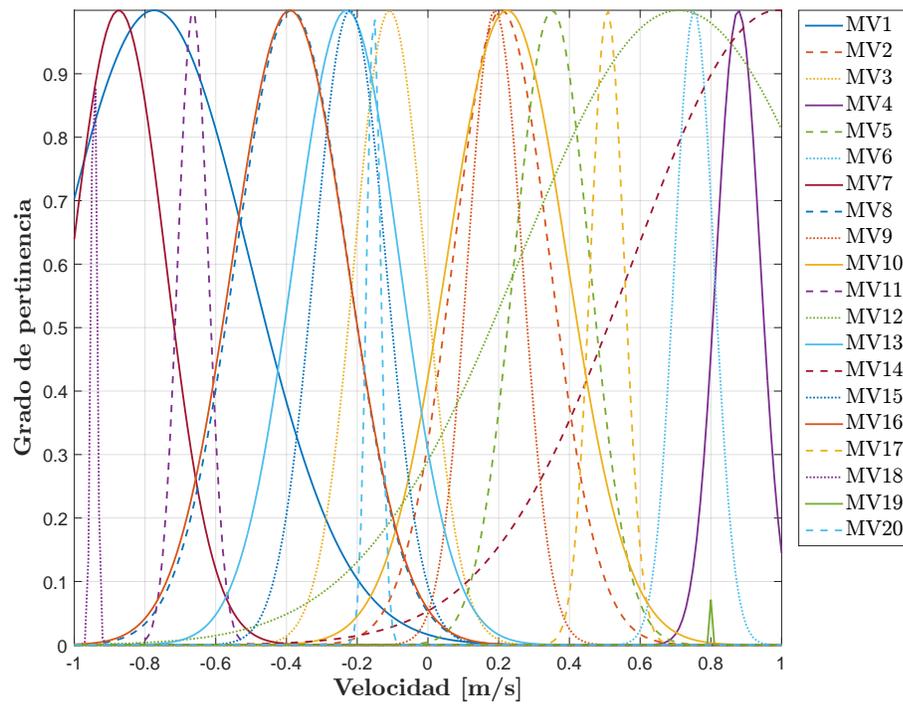


Figura 7.2.: Funciones de pertinencia para la velocidad-FLC-2
Fuente: Autor

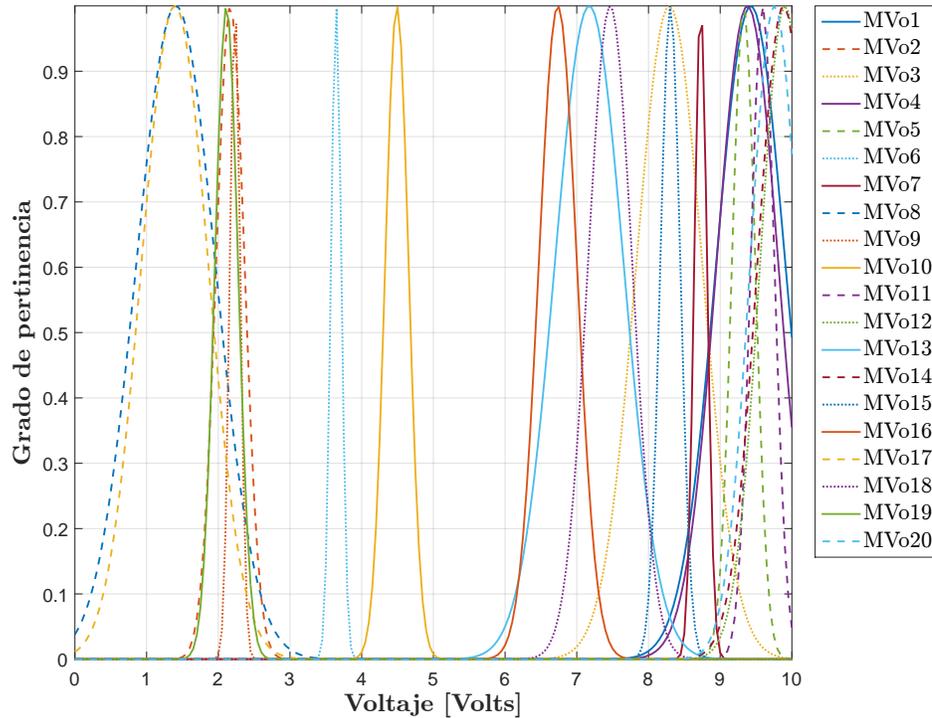


Figura 7.3.: Funciones de pertinencia para el voltaje-FLC-2:
Fuente: Autor

En el sistema de control de lógica difusa clásica FLC-1, se utilizaron 49 reglas basadas en los parámetros lingüísticos del sistema de inferencia descrito la Tabla 4.1. En el controlador FLC-2 se redujo esta cantidad aproximadamente en un 59 %, ya que solamente se emplearon 20 reglas difusas en la construcción del sistema de inferencia.

Los sistemas de inferencia desarrollados para los controladores FLC-1 y FLC-2 se ilustran en las Figuras 7.4 y 7.5. Adicionalmente, las Figuras 7.6 y 7.7 presentan los diagramas de superficie difusa asociados a cada controlador. La gráfica de superficie difusa generada por el controlador FLC-2, presenta un comportamiento variable que puede explicarse debido a la naturaleza aleatoria a través de la cual fue generada. Contrario a esto, la gráfica de superficie generada por el controlador FLC-1 tiene un comportamiento más uniforme en su configuración.

La Tabla 7.2 resume el conjunto de parámetros del sistema de inferencia asociado al individuo P_1 seleccionado en este análisis. Las variables a_1 , b_1 son los parámetros para el desplazamiento; a_2 , b_2 son los parámetros para la velocidad y a_3 , b_3 son los parámetros definidos para el voltaje.

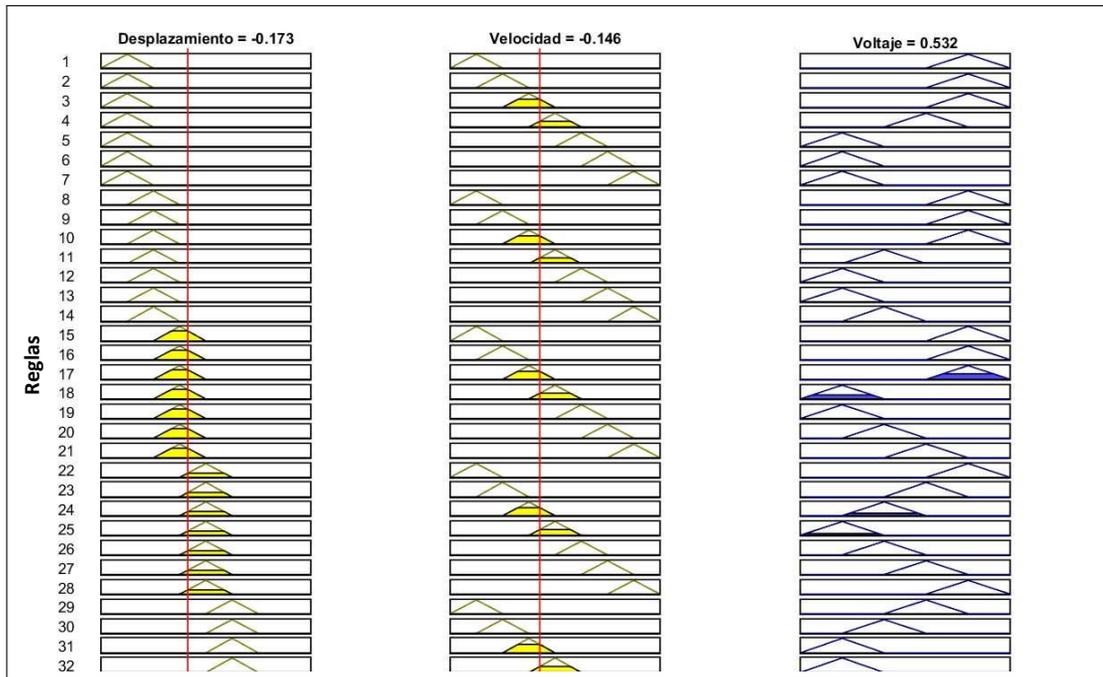


Figura 7.4.: Sistema de inferencia para el controlador FLC-1
Fuente: Autor

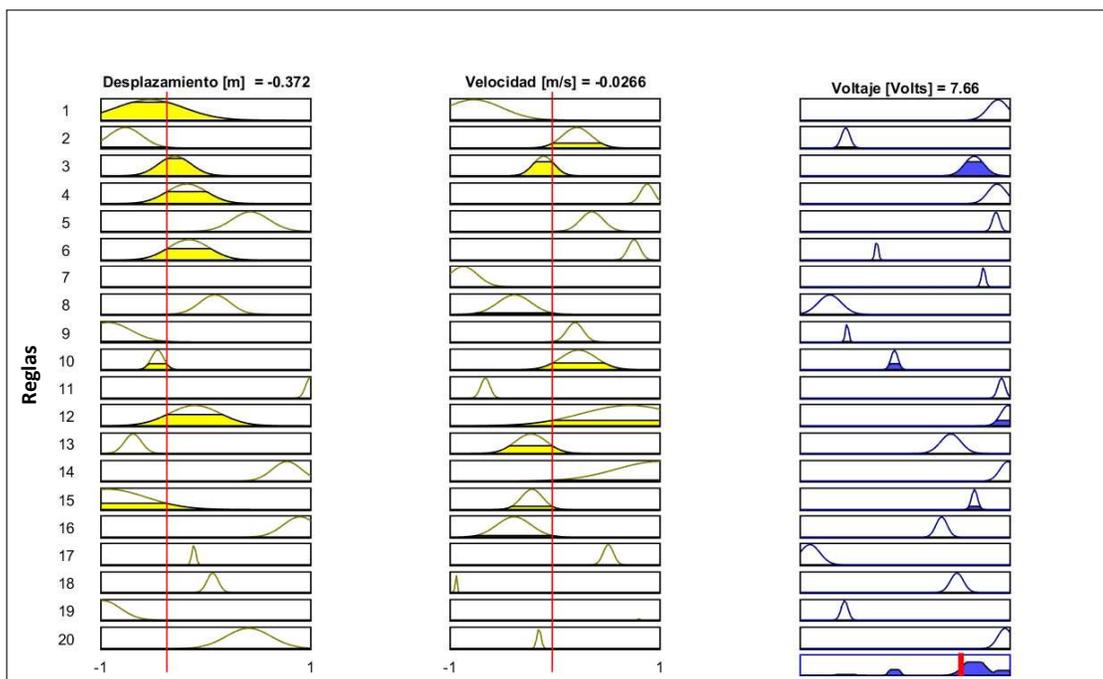


Figura 7.5.: Sistema de inferencia para el controlador FLC-2
Fuente: Autor

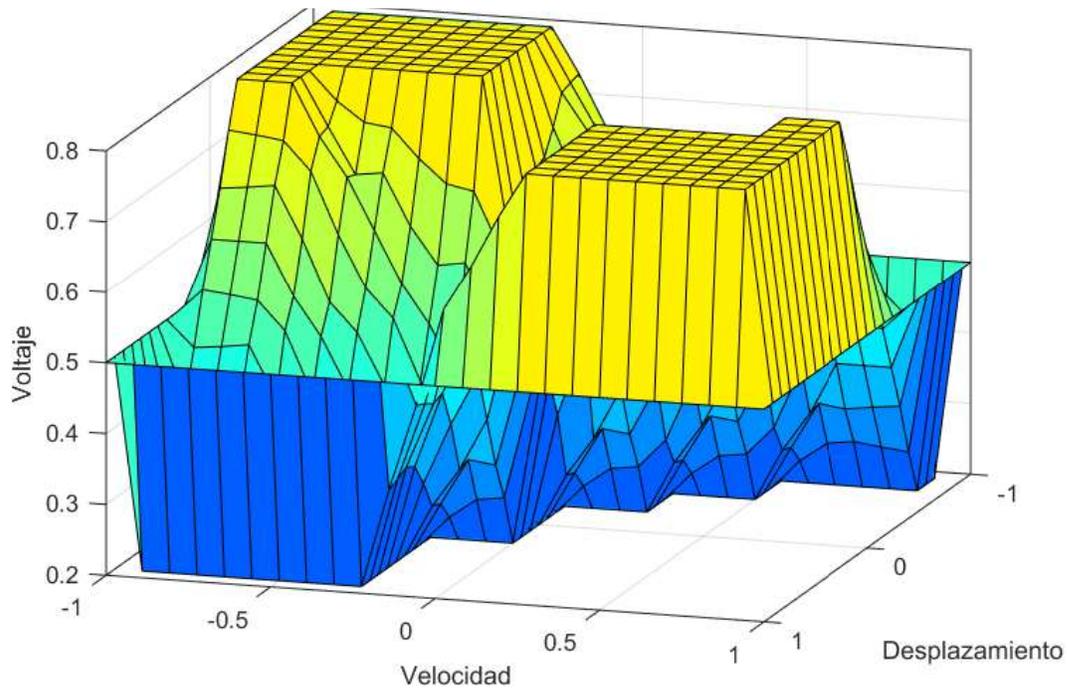


Figura 7.6.: Superficie difusa para el controlador FLC-1
Fuente: Autor

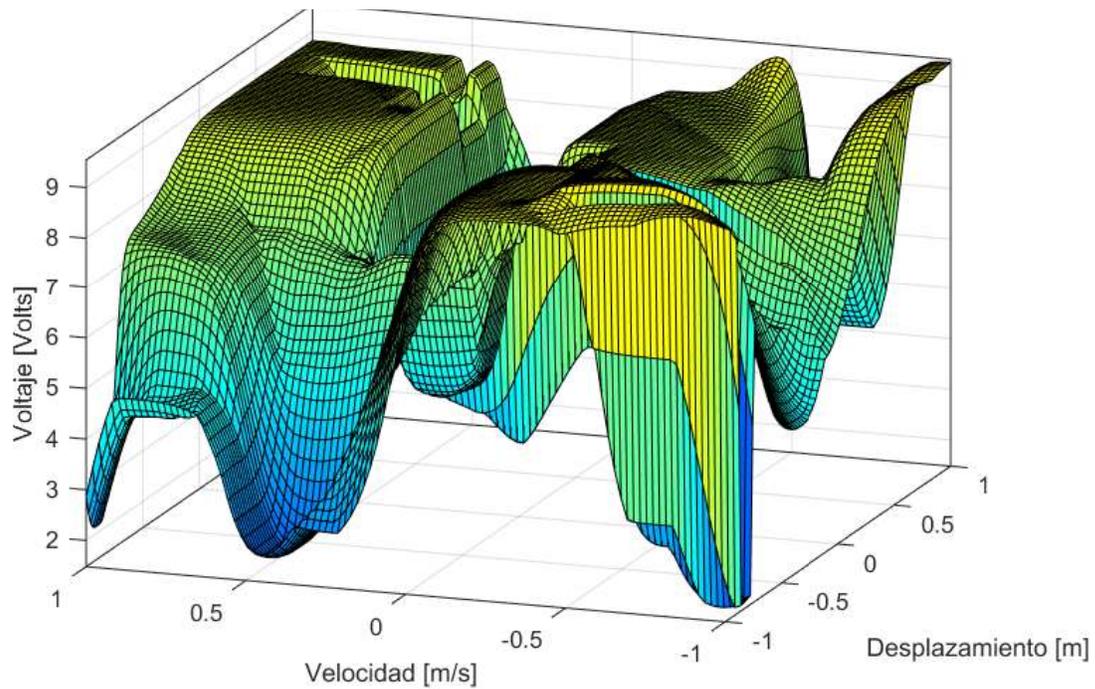


Figura 7.7.: Superficie difusa para el controlador FLC-2
Fuente: Autor

Tabla 7.2.: Parámetros optimizados del individuo P_1 para el FLC-2

Fuente: Autor

Reglas	a₁	b₁	a₂	b₂	a₃	b₃
Regla 1	0.327	-0.534	0.270	-0.774	0.482	9.426
Regla 2	0.159	-0.768	0.137	0.208	0.198	2.168
Regla 3	0.155	-0.296	0.100	-0.109	0.459	8.291
Regla 4	0.191	-0.182	0.062	0.878	0.430	9.380
Regla 5	0.175	0.426	0.107	0.351	0.163	9.327
Regla 6	0.194	-0.162	0.056	0.753	0.073	3.644
Regla 7	0.000	0.352	0.133	-0.874	0.090	8.728
Regla 8	0.145	0.086	0.159	-0.386	0.550	1.408
Regla 9	0.215	-0.929	0.077	0.190	0.073	2.233
Regla 10	0.058	-0.461	0.170	0.224	0.163	4.491
Regla 11	0.042	0.993	0.043	-0.664	0.166	9.591
Regla 12	0.244	-0.106	0.451	0.709	0.347	9.904
Regla 13	0.081	-0.694	0.150	-0.230	0.479	7.173
Regla 14	0.139	0.772	0.409	0.990	0.365	9.884
Regla 15	0.368	-0.937	0.101	-0.220	0.140	8.304
Regla 16	0.158	0.896	0.163	-0.390	0.266	6.736
Regla 17	0.018	-0.114	0.048	0.507	0.465	1.395
Regla 18	0.053	0.065	0.008	-0.944	0.309	7.465
Regla 19	0.167	-0.982	0.002	0.796	0.161	2.114
Regla 20	0.212	0.408	0.020	-0.153	0.339	9.757

El proceso de evolución partiendo desde la primera generación para la aptitud de control de los individuos optimizados por el NSGA-II se resume en la Figura 7.8.

Los puntos indicados en estos esquemas representan diferentes sistemas de inferencia desarrollados para el FLC-2, los cuales son mejorados mediante la metodología de optimización de no dominancia del NSGA-II. Estos controladores pueden ser empleados por el usuario para generar fuerzas de control.

La anterior característica marca otra de las principales diferencias que existe con los controladores de lógica difusa clásica, los cuales limitan su operación a un único sistema de inferencia.

Se destaca el hecho de que en las primeras generaciones los individuos se encuentran dispersos entre sí. En la medida que avanza el proceso de optimización, las posibles soluciones potenciales van convergiendo a regiones más localizadas hasta conformar el frente de Pareto del MOP (Problema de Optimización Multi-objetivo).

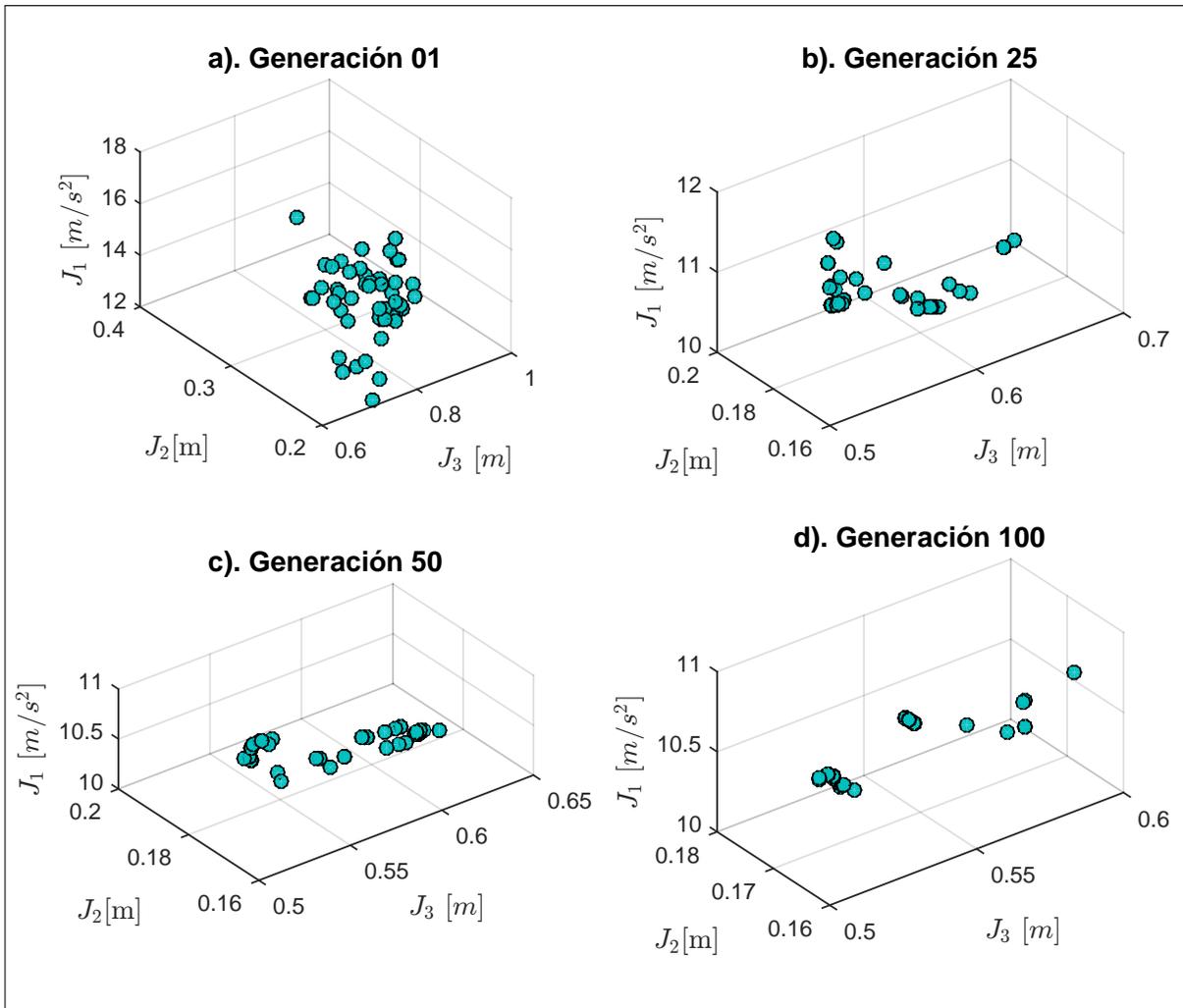


Figura 7.8.: Evolución de los individuos del NSGA-II para el sismo de Kobe

Fuente: Autor

La Figura 7.9 compara la evolución para la aptitud de control de las funciones objetivo en la última iteración del NSGA-II (generación 100). El individuo P_1 se ha diferenciado de los demás elementos de la población a través de la marcación de color rojo en los esquemas.

La Figura 7.9 a). compara la respuesta pico de aceleraciones con el valor RMS máximo de desplazamientos de la estructura. De forma semejante, la Figura 7.9 b). relaciona el comportamiento de la respuesta pico de aceleraciones en función de la respuesta pico de desplazamientos. Finalmente en la Figura 7.9 c). se compara la respuesta pico de desplazamientos respecto al valor RMS máximo de desplazamientos.

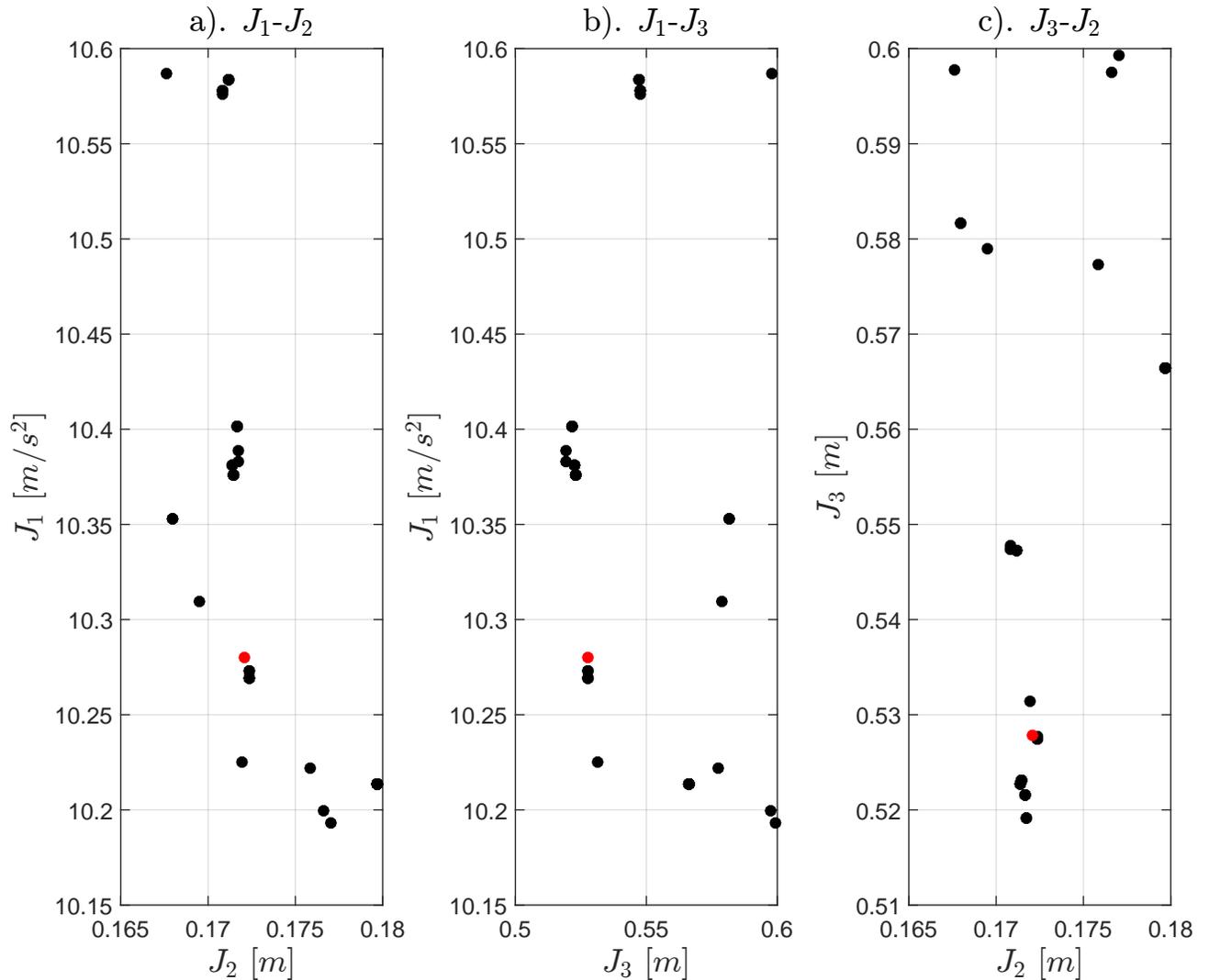


Figura 7.9.: Evolución en la generación 100 del NSGA-II para el sismo de Kobe

Fuente: Autor

La función de respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32 se presenta en la Figura 7.10. Se analiza la condición no controlada y las condiciones optimizadas por los sistemas FLC-1 y FLC-2.

La respuesta pico de desplazamientos para el sistema no controlado se alcanza en el tiempo $t=11.69$ s con un valor 0.93 m. El FLC-1 reduce este desplazamiento en un 46.3 %, mientras que el FLC-2 lo hace en un 70.9 %.

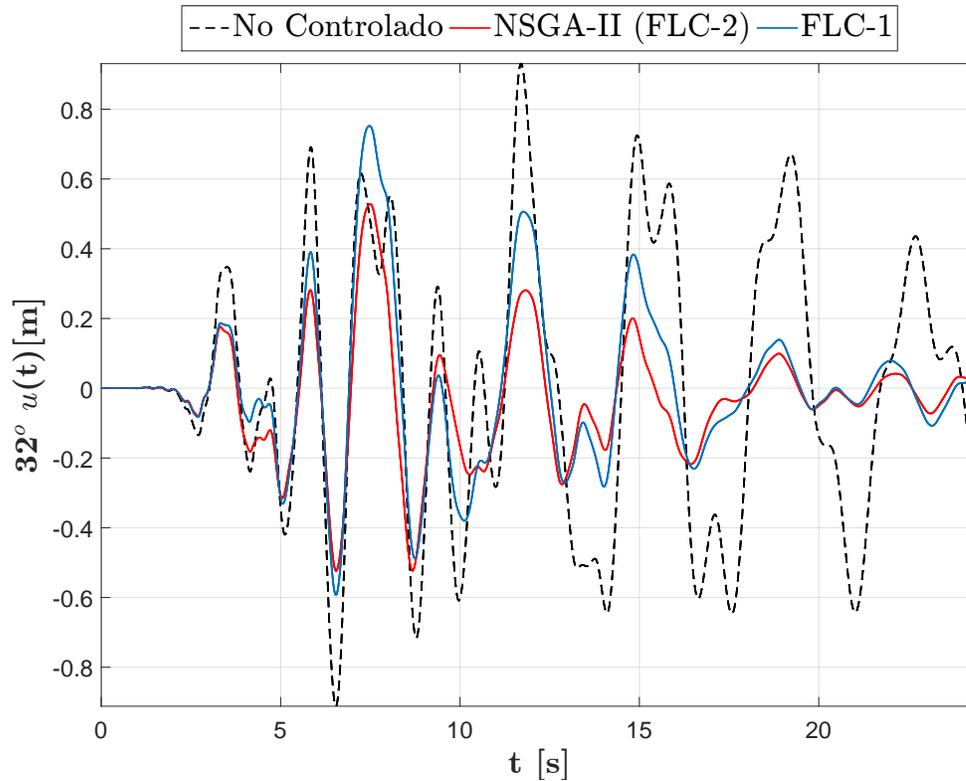


Figura 7.10.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Kobe

Fuente: Autor

De acuerdo con Zahrai [147], los amortiguadores MR producen curvas que disipan la energía de la estructura en movimiento. La cantidad de energía disipada por el amortiguador depende de dos tipos de ciclos histeréticos: en el primero, la fuerza del amortiguador depende de su velocidad relativa y en el segundo, la fuerza del amortiguador depende de su desplazamiento relativo.

La suma del área generada por ambos ciclos es igual al valor de la energía de disipación del amortiguador MR. Las Figuras 7.11 y 7.12 presentan las curvas características del comportamiento histerético para el dispositivo instalado en el primer nivel de la edificación.

Con el propósito de disminuir el esfuerzo computacional en la programación de los controladores, los seis amortiguadores MR empleados en el análisis fueron calibrados con la misma fuerza de amortiguamiento.

La curva de voltaje generada para los dispositivos empleados en el FLC-2 se ilustra en la Figura 7.13.

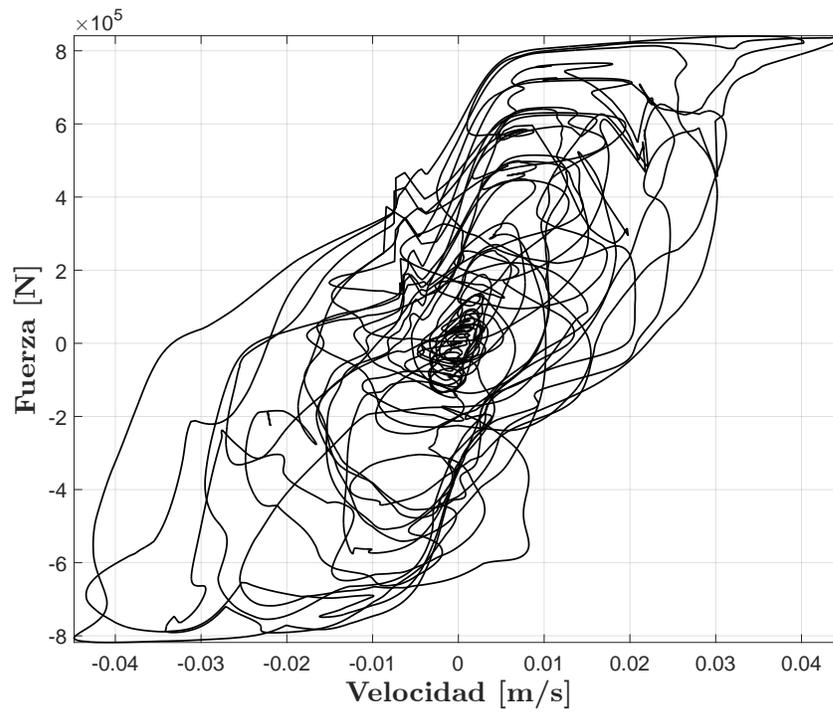


Figura 7.11.: Curva de histéresis para el ciclo de velocidad en el amortiguador MR
Fuente: Autor

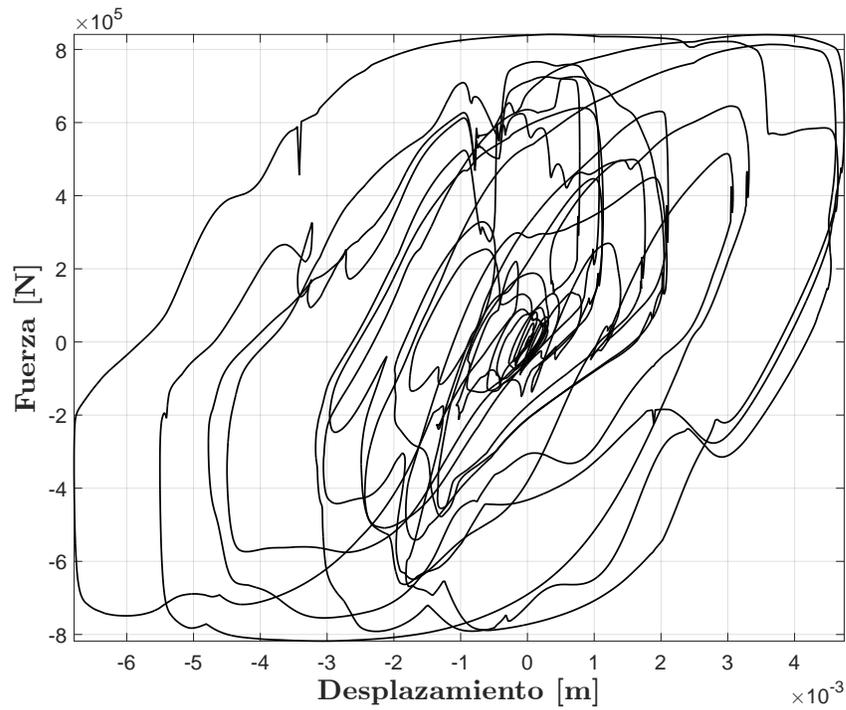


Figura 7.12.: Curva de histéresis para el ciclo de desplazamiento en el amortiguador MR
Fuente: Autor

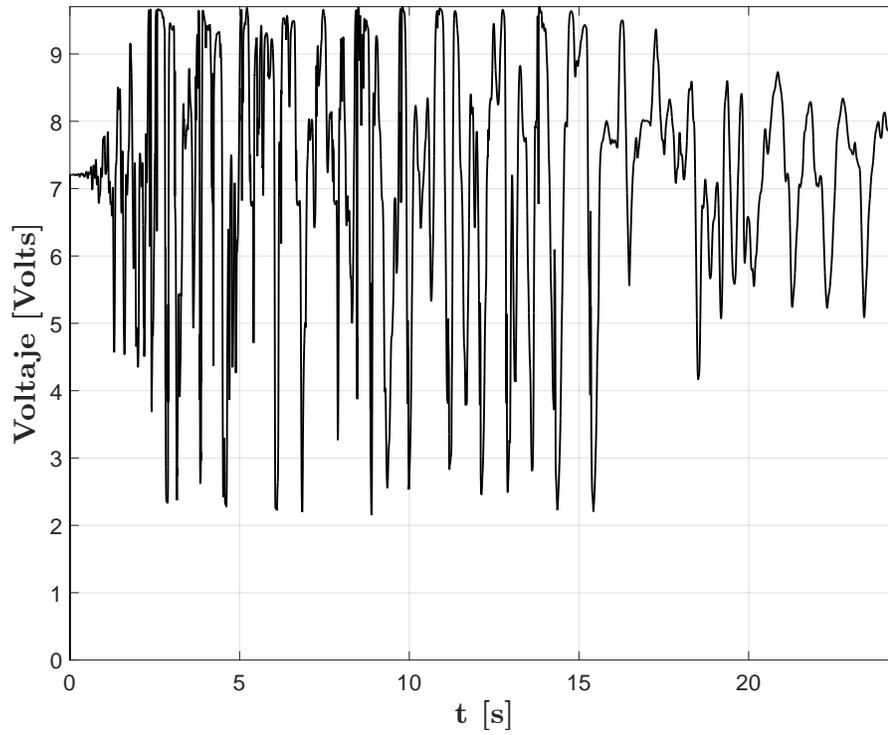


Figura 7.13.: Función de voltaje para los amortiguadores MR
Fuente: Autor

Este controlador asigna valores altos al voltaje de salida cuando el desplazamiento del último nivel de la edificación aumenta de forma considerable, con lo cual se logra ejercer un mejor control sobre la estructura.

La Figura 7.14 compara los máximos valores para las respuestas RMS de desplazamientos y RMS de aceleraciones de la edificación. En el nivel de piso 32 el máximo valor RMS de desplazamientos obtenido para el FLC-2 es 0.172 m, lo cual equivale a una reducción del 55.7% respecto a la respuesta obtenida para el sistema no controlado y a un 24.6% respecto al valor de respuesta determinado para el FLC-1. La respuesta RMS de aceleraciones alcanzada por el controlador FLC-2, se reduce en un 57.2% en relación con el valor hallado para sistema no controlado y en un 18.6% respecto al resultado obtenido por el FLC-1.

Las derivas máximas de piso se indican en la Figura 7.15 y fueron calculadas para tener una noción del nivel de daño ocasionado en la estructura. Esta figura presenta un comportamiento particular, lo cual se debe a la variación de la rigidez en altura de los elementos tipo columna y a su relación ancho/espesor. En el nivel de piso 25 se obtuvo un valor del 2.2% para el sistema no controlado, mientras que para el FLC-1 y el FLC-2 se obtuvieron derivas máximas del 1.5% y 1.2% respectivamente.

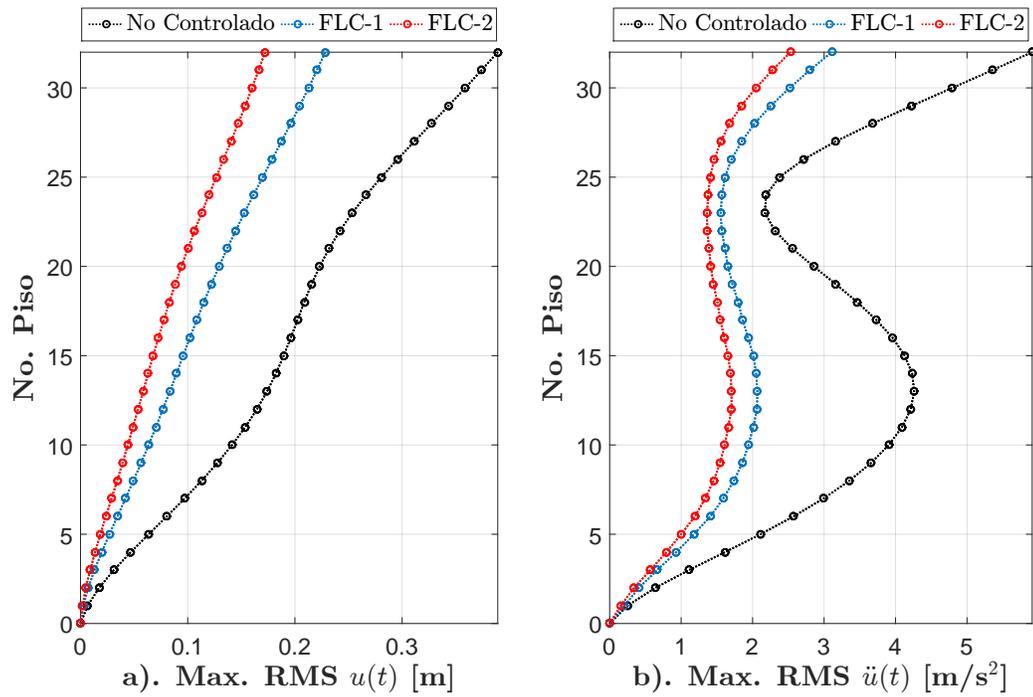


Figura 7.14.: Respuestas RMS-Kobe: a). Desplazamiento b). Aceleración
Fuente: Autor

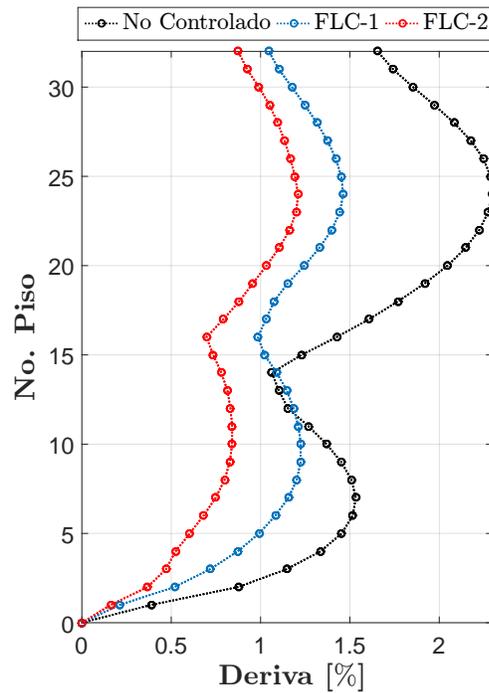


Figura 7.15.: Derivas máximas de piso-Kobe
Fuente: Autor

7.1.2. Desempeño general de los controladores FLC-1 y FLC-2

Las Tablas 7.3 y 7.4 presentan los valores máximos de las respuestas RMS de desplazamientos y RMS de aceleraciones para los modelos numéricos de los sismos descritos en la Tabla 6.1. En promedio el controlador FLC-1 mejora en un 38.5 % la respuesta RMS máxima de desplazamientos y en un 26.8 % la respuesta RMS máxima de aceleraciones, respecto al sistema no controlado. El controlador FLC-2 supera el desempeño promedio alcanzado por el controlador FLC-1 en un 26.4 % para la respuesta máxima RMS de desplazamientos y en un 9.0 % para la respuesta máxima RMS de aceleraciones. Respecto al sistema no controlado el FLC-2 mejora en promedio un 54.5 % la respuesta máxima RMS de desplazamientos y un 33.0 % la respuesta máxima RMS de aceleraciones.

Tabla 7.3.: Comparación: respuestas máximas RMS de desplazamientos
Fuente: Autor

Sismo	Max. RMS Desplazamiento [m]				
	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.095	0.047	50.67	0.036	62.47
Morgan Hill	0.060	0.045	24.00	0.032	45.76
Loma Prieta	0.227	0.133	41.40	0.091	59.78
Petrolia	0.124	0.080	35.82	0.062	50.07
Northridge	0.130	0.101	22.38	0.084	35.92
Kobe	0.389	0.228	41.35	0.172	55.76
Nueva Zelanda	0.320	0.163	49.01	0.111	65.16
Italia	0.100	0.056	43.46	0.039	61.35

Tabla 7.4.: Comparación:respuestas máximas RMS de aceleraciones
Fuente: Autor

Sismo	Max. RMS Aceleración [m/s²]				
	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	1.428	1.028	28.01	0.944	33.86
Morgan Hill	2.237	1.902	14.99	1.860	16.87
Loma Prieta	4.562	3.518	22.88	3.202	29.82
Petrolia	1.846	1.570	14.97	1.460	20.92
Northridge	5.080	3.830	24.60	3.617	28.81
Kobe	5.911	3.107	47.45	2.529	57.22
Nueva Zelanda	2.345	1.621	30.87	1.419	39.50
Italia	2.848	1.983	30.38	1.802	36.71

Los valores para las derivas máximas de piso se indican en la Tabla 7.5. En el sismo de El Centro se presentan los mejores resultados para los porcentajes de reducción respecto al

sistema no controlado. En el FLC-1 este indicador se redujo en un 44.0% y en el FLC-2 en un 60.2%.

Tabla 7.5.: Derivas máximas de piso y porcentajes de reducción

Fuente: Autor

Derivas Máximas de Piso [%]					
Sismo	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.701	0.393	43.98	0.279	60.18
Morgan Hill	1.021	0.835	18.19	0.824	19.29
Loma Prieta	1.593	1.276	19.92	1.053	33.89
Petrolia	0.515	0.441	14.43	0.328	36.43
Northridge	1.444	1.284	11.07	1.152	20.26
Kobe	2.296	1.462	36.32	1.210	47.30
Nueva Zelanda	1.821	1.270	30.22	1.022	43.85
Italia	1.345	1.054	21.63	0.787	41.47

Respecto a los índices de desempeño para las funciones objetivo del NSGA-II, la Tabla 7.6 presenta los valores finales obtenidos para los sistemas de inferencia de la última generación y con las mayores distancias de hacinamiento. El mejor valor para la repuesta pico de aceleraciones se obtuvo en el sismo de Kobe ($J_1=0.480$), para la respuesta RMS de desplazamientos en el sismo de Nueva Zelanda ($J_2=0.348$) y para la respuesta pico de desplazamientos en el sismo de El centro ($J_3=0.319$).

Tabla 7.6.: Criterios de desempeño para el controlador FLC-2

Fuente: Autor

Sismo	Funciones objetivo		
	J_1	J_2	J_3
El Centro	0.702	0.374	0.319
Morgan Hill	0.877	0.542	0.616
Loma Prieta	0.690	0.402	0.559
Petrolia	0.908	0.506	0.556
Northridge	0.838	0.635	0.677
Kobe	0.480	0.442	0.567
Nueva Zelanda	0.666	0.348	0.530
Italia	0.903	0.355	0.368
Promedio	0.758	0.451	0.524

Nota: el valor más bajo es un indicador de mayor rendimiento.

Las Figuras 7.16 a 7.22 presentan las funciones de respuestas de desplazamiento del nivel 32 para los sismos que no fueron analizados en el caso particular de la sección 7.1.1.

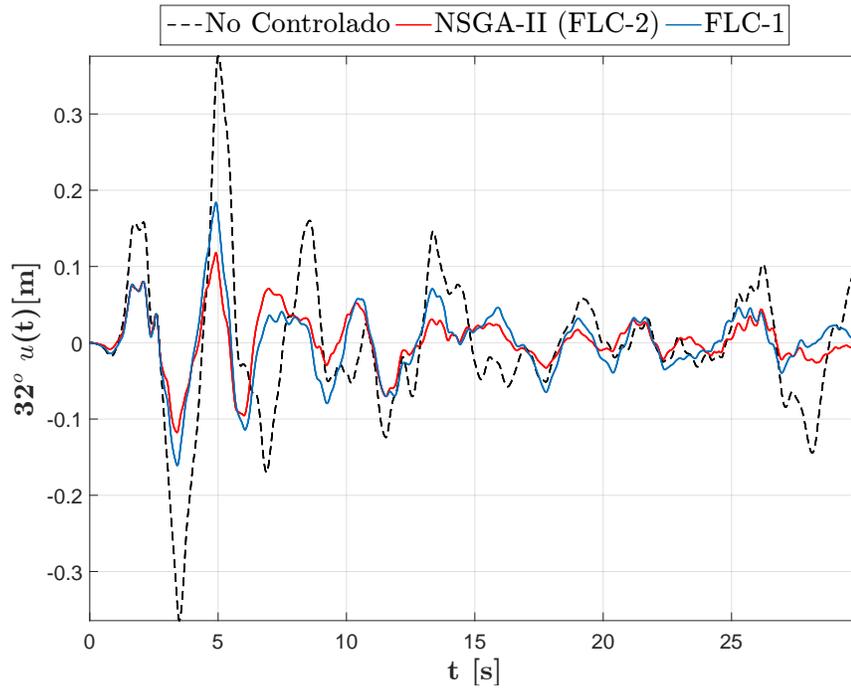


Figura 7.16.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-El Centro
Fuente: Autor

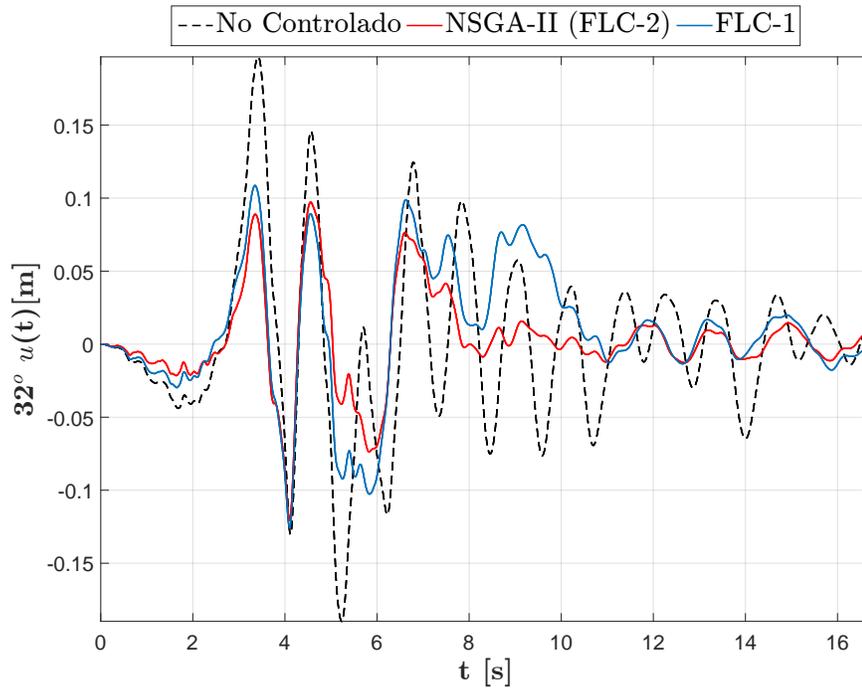


Figura 7.17.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Morgan Hill
Fuente: Autor

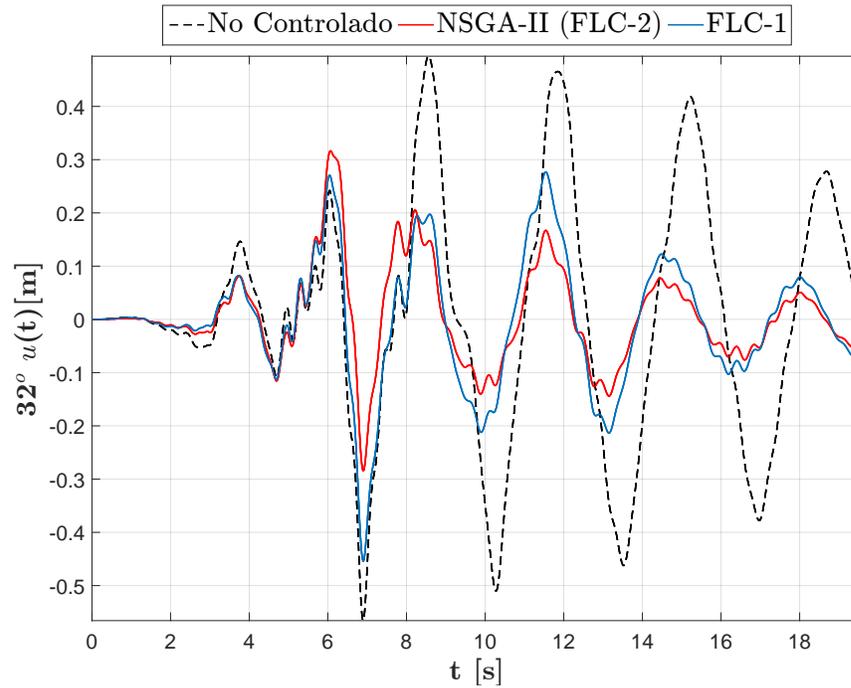


Figura 7.18.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Loma Prieta
Fuente: Autor

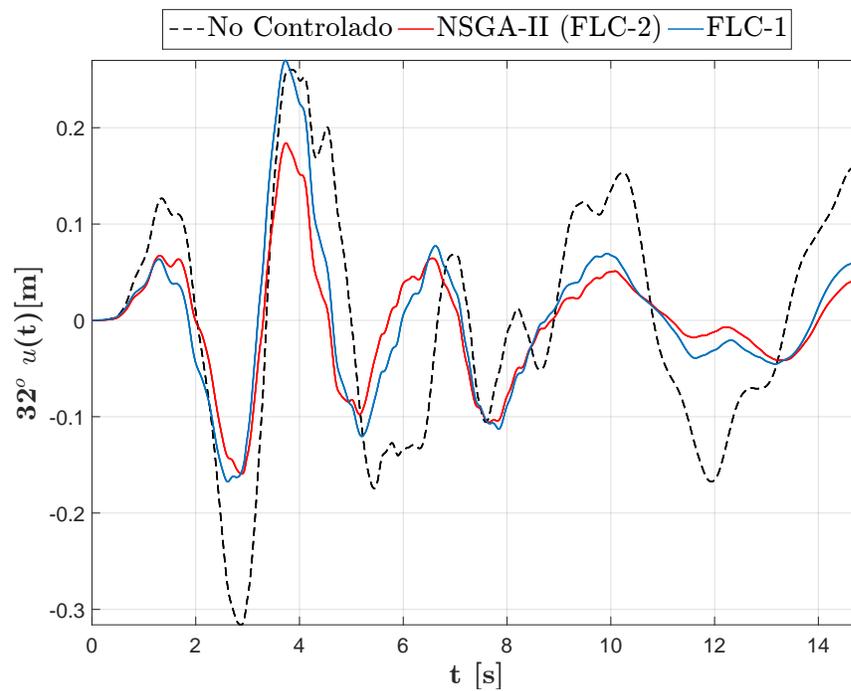


Figura 7.19.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Petrolia
Fuente: Autor

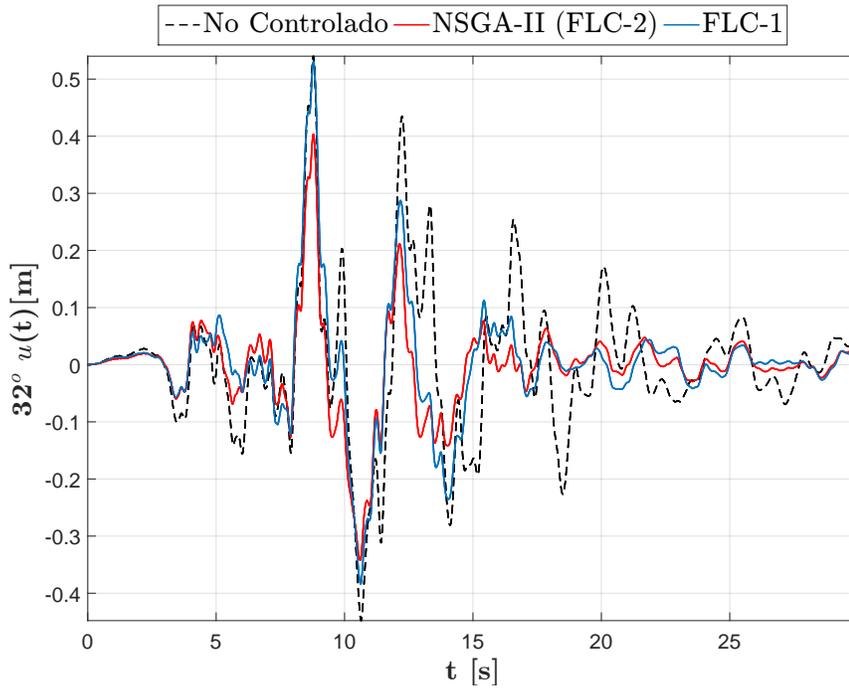


Figura 7.20.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Northridge
Fuente: Autor

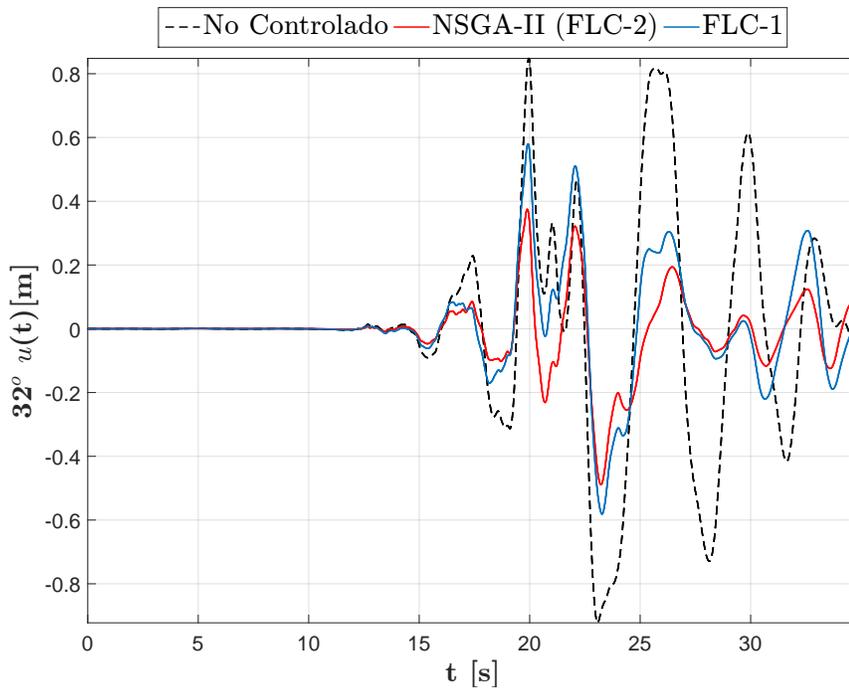


Figura 7.21.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

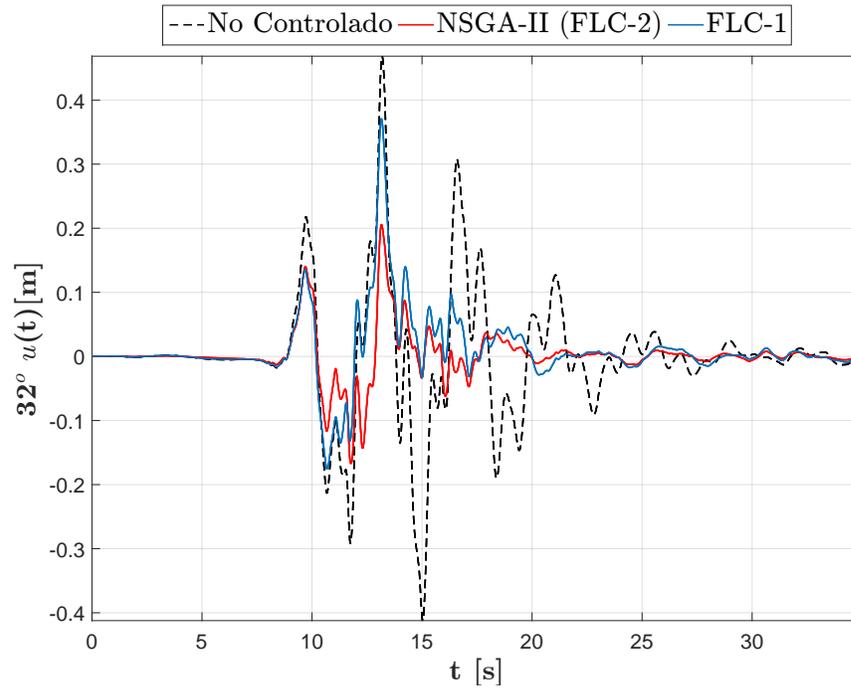


Figura 7.22.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 32-Italia
Fuente: Autor

Las Figuras 7.23 a 7.29 presentan las respuestas máximas RMS de desplazamientos y RMS de aceleraciones para los sismos que no fueron analizados en el caso particular de la sección 7.1.1.

Adicionalmente, desde la Figura 7.30 hasta la Figura 7.36 se presentan las gráficas para las derivas máximas de piso de los sismos que no fueron analizados en el caso particular de la sección 7.1.1.

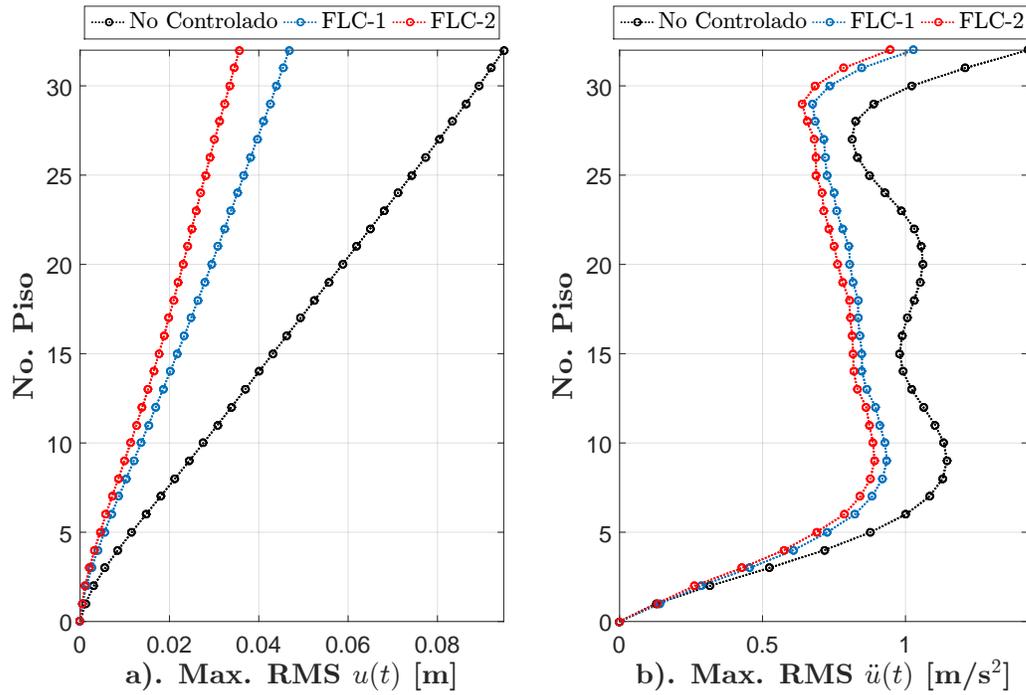


Figura 7.23.: Respuestas RMS para El Centro: a). Desplazamiento b). Aceleración
Fuente: Autor

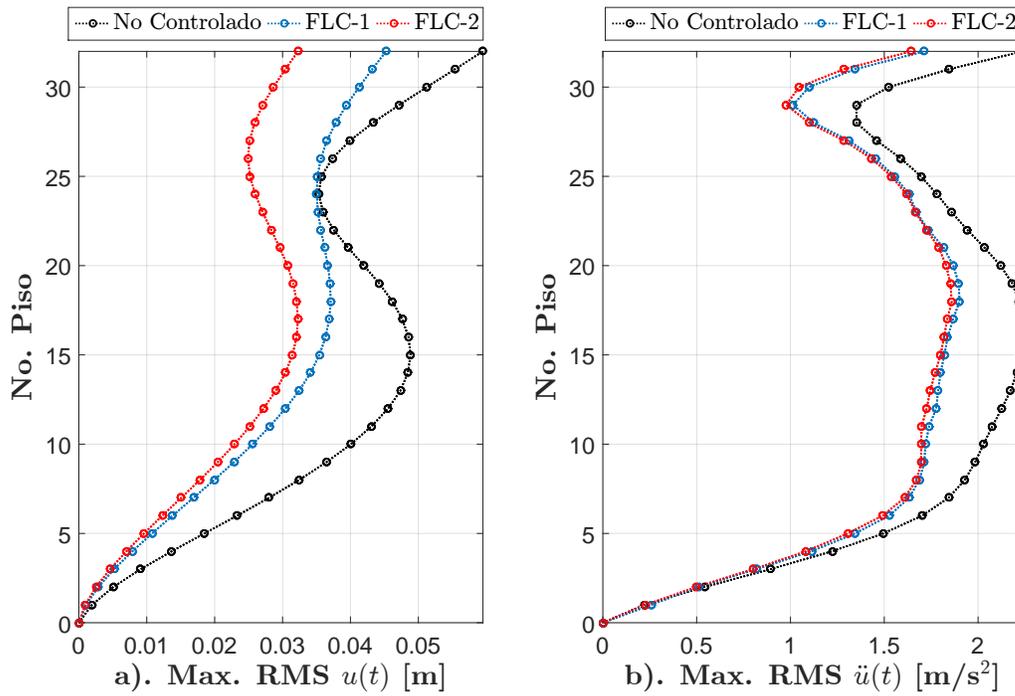


Figura 7.24.: Respuestas RMS para Morgan Hill: a). Desplazamiento b). Aceleración
Fuente: Autor

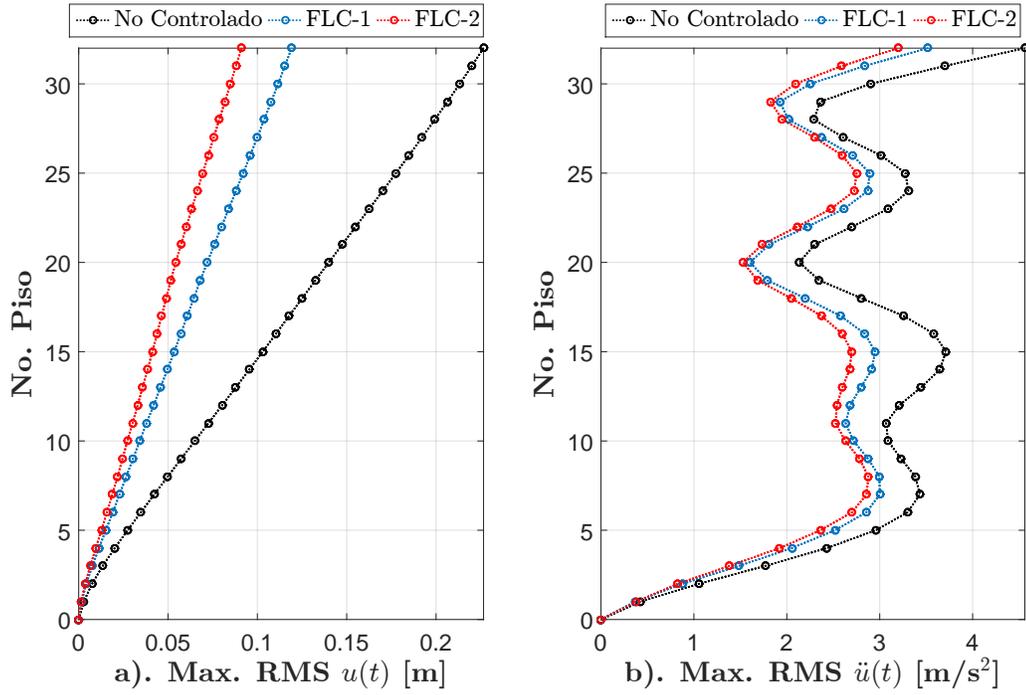


Figura 7.25.: Respuestas RMS para Loma Prieta: a). Desplazamiento b). Aceleración
Fuente: Autor

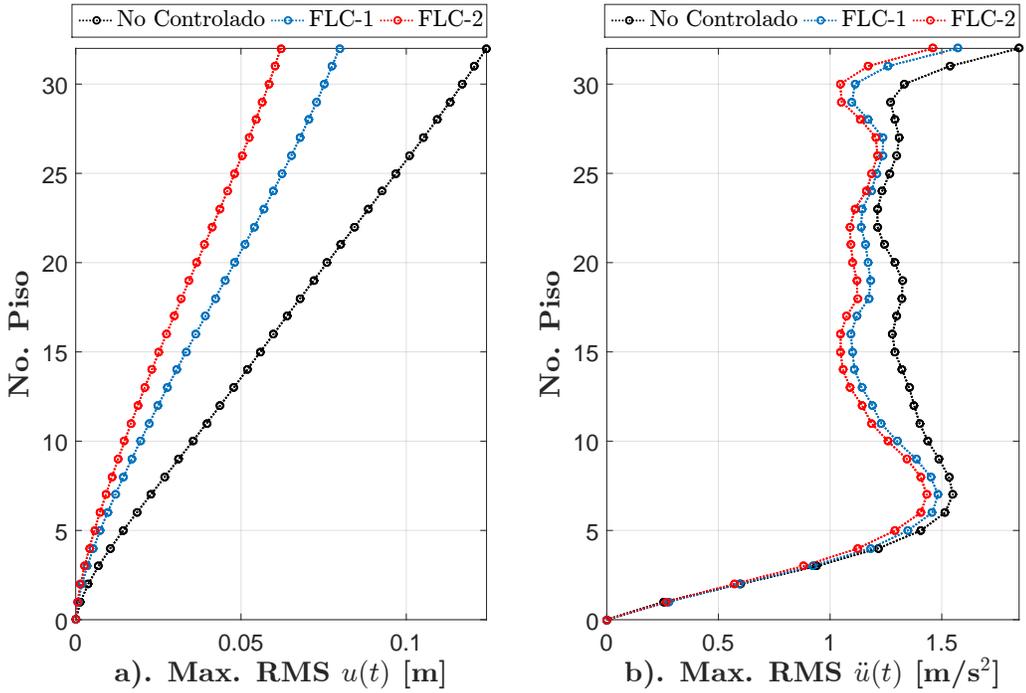


Figura 7.26.: Respuestas RMS para Petrolia: a). Desplazamiento b). Aceleración
Fuente: Autor

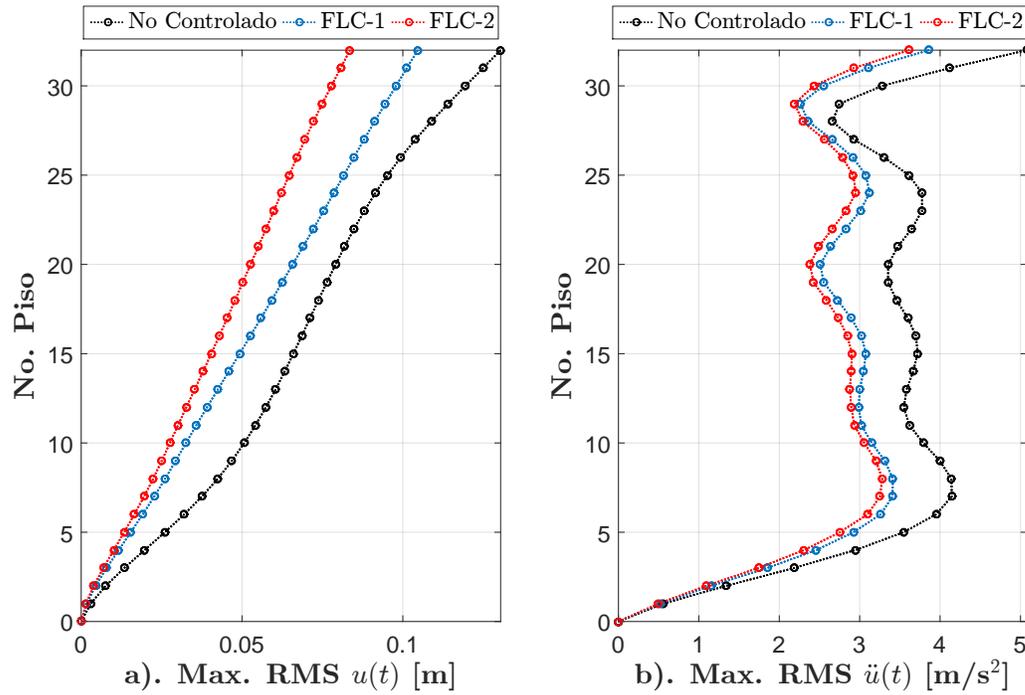


Figura 7.27.: Respuestas RMS para Northridge: a). Desplazamiento b). Aceleración
Fuente: Autor

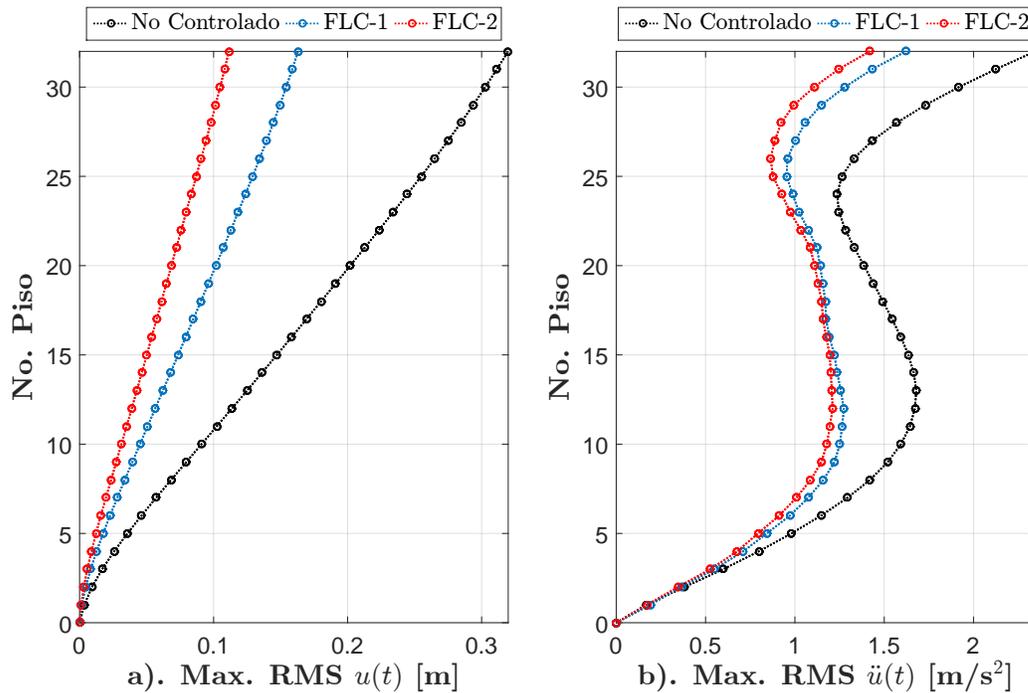


Figura 7.28.: Respuestas RMS para Nueva Zelanda: a). Desplazamiento b). Aceleración
Fuente: Autor

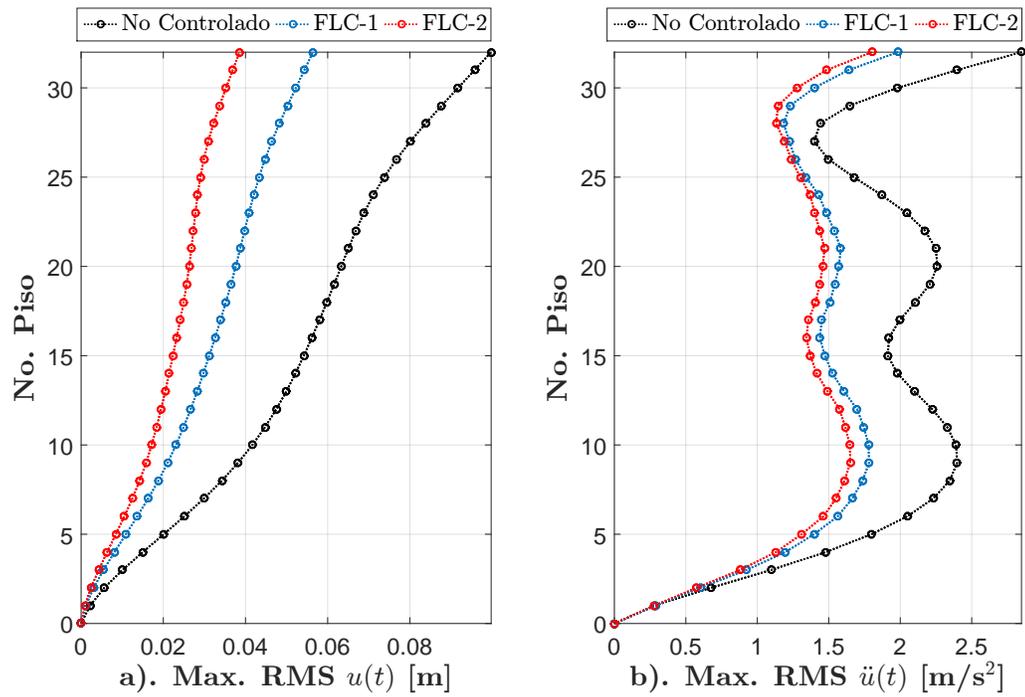


Figura 7.29.: Respuestas RMS para Italia: a). Desplazamiento b). Aceleración
Fuente: Autor

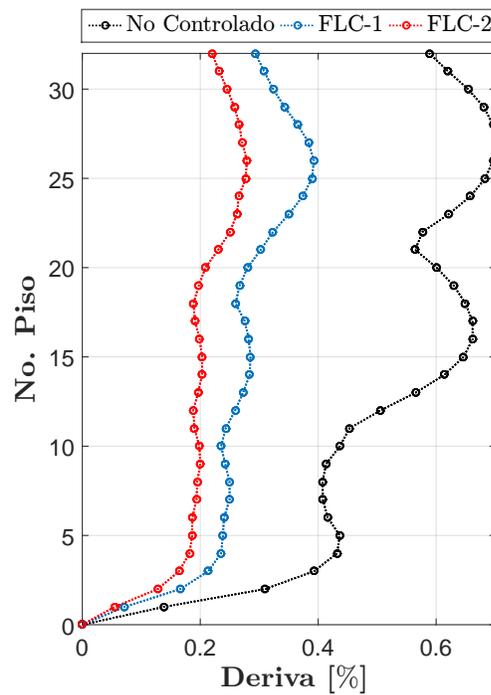


Figura 7.30.: Derivas máximas de piso para El Centro
Fuente: Autor

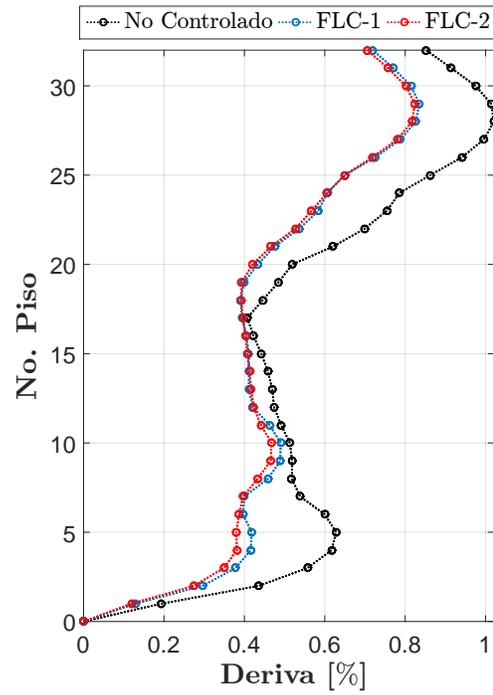


Figura 7.31.: Derivas máximas de piso para Morgan Hill
Fuente: Autor

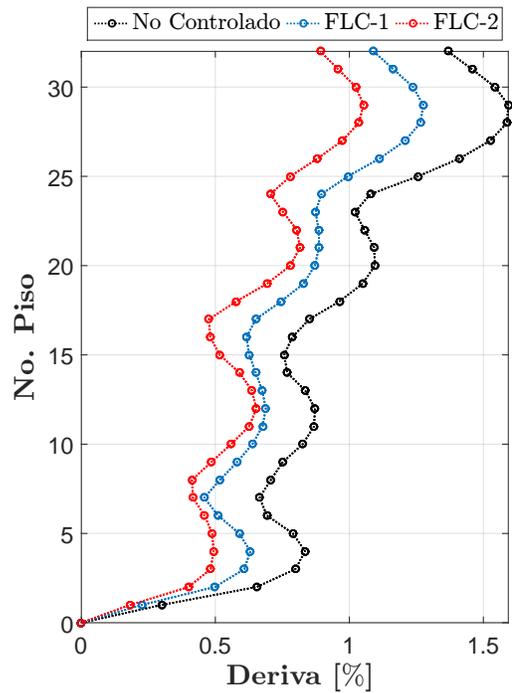


Figura 7.32.: Derivas máximas de piso para Loma Prieta
Fuente: Autor

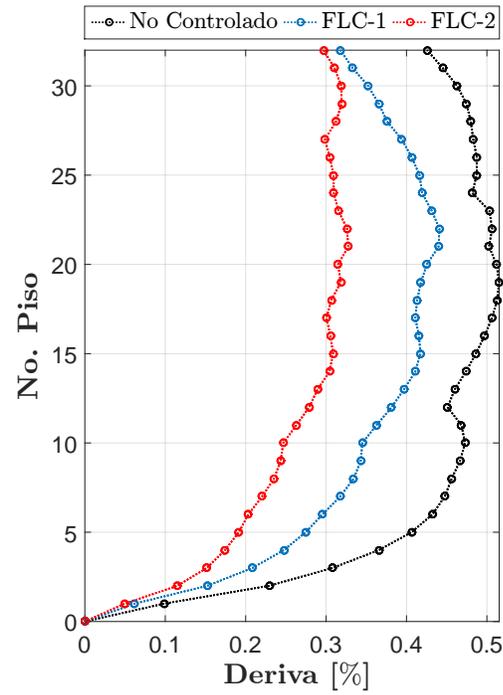


Figura 7.33.: Derivas máximas de piso para Petrolia
Fuente: Autor

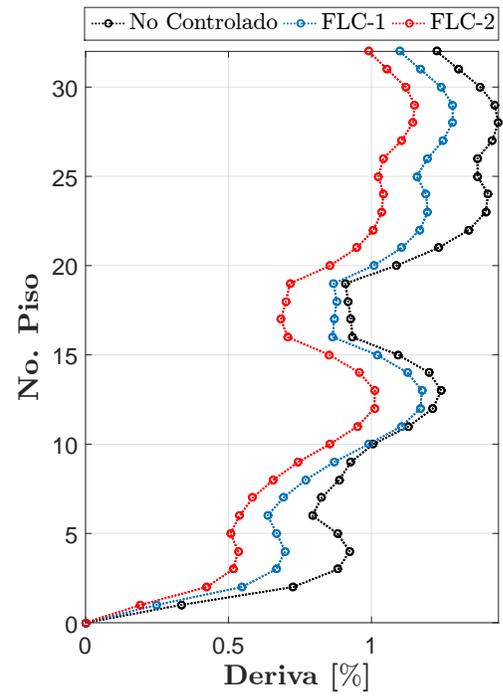


Figura 7.34.: Derivas máximas de piso para Northridge
Fuente: Autor

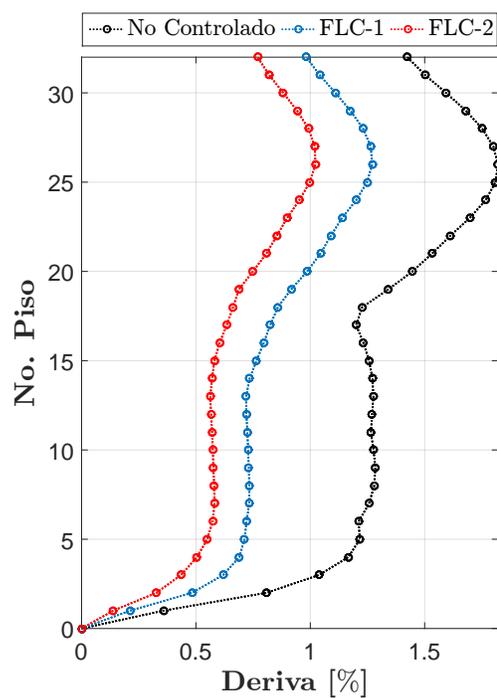


Figura 7.35.: Derivas máximas de piso para Nueva Zelanda
Fuente: Autor

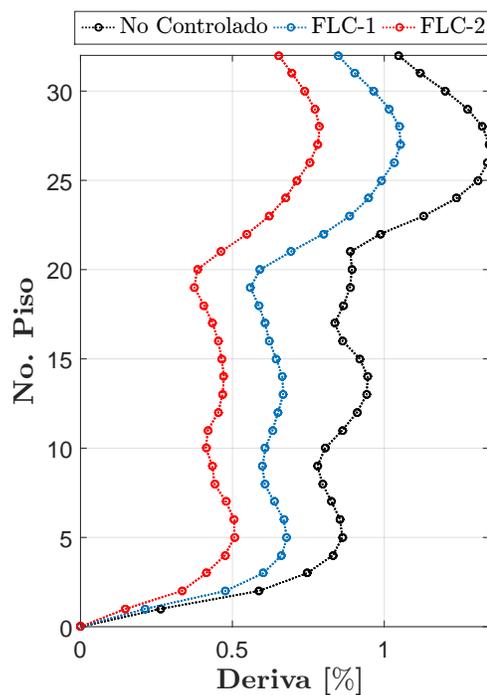


Figura 7.36.: Derivas máximas de piso para Italia
Fuente: Autor

7.2. Caso estudio No. 2

En la sección 7.2.1 se analizan los resultados obtenidos para el pórtico tridimensional caracterizado en la sección 6.2.2. Se realiza una revisión detallada para el sismo de Loma Prieta, en el cual se obtuvo uno de los mejores resultados en el proceso de optimización. La sección 7.2.2 presenta un análisis general del desempeño de los controladores para los demás registros de aceleraciones.

7.2.1. Análisis para el sismo de Loma Prieta

La Tabla 7.7 define los índices finales de desempeño, el rango R_i y la distancia de hacinamiento H de los individuos P_i , optimizados por el NSGA-II para el sismo de Loma Prieta.

Tabla 7.7.: Resultados generados por el NSGA-II para el sismo de Loma Prieta
Fuente: Autor

P_i	J_1	J_2	J_3	R_i	H	P_i	J_1	J_2	J_3	R_i	H
1	0.827	0.622	0.684	1	0.016	26	0.787	0.634	0.684	1	0.000
2	0.785	0.636	0.697	1	0.016	27	0.826	0.623	0.686	1	0.000
3	0.787	0.633	0.684	1	0.016	28	0.823	0.630	0.670	1	0.000
4	0.786	0.633	0.684	1	0.011	29	0.787	0.633	0.684	1	0.000
5	0.825	0.630	0.663	1	0.010	30	0.823	0.630	0.670	1	0.000
6	0.787	0.633	0.684	1	0.008	31	0.826	0.623	0.686	1	0.000
7	0.820	0.641	0.668	1	0.007	32	0.825	0.630	0.665	1	0.000
8	0.825	0.625	0.681	1	0.006	33	0.821	0.640	0.671	1	0.000
9	0.785	0.636	0.697	1	0.001	34	0.824	0.630	0.667	1	0.000
10	0.785	0.636	0.697	1	0.000	35	0.825	0.627	0.679	1	0.000
11	0.823	0.630	0.672	1	0.000	36	0.820	0.641	0.670	1	0.000
12	0.785	0.636	0.697	1	0.000	37	0.823	0.631	0.670	1	0.000
13	0.826	0.623	0.686	1	0.000	38	0.780	0.640	0.694	1	0.000
14	0.826	0.623	0.686	1	0.000	39	0.826	0.623	0.686	1	0.000
15	0.784	0.634	0.699	1	0.000	40	0.787	0.633	0.684	1	0.000
16	0.825	0.625	0.680	1	0.000	41	0.821	0.640	0.670	1	0.000
17	0.826	0.623	0.686	1	0.000	42	0.787	0.633	0.684	1	0.000
18	0.826	0.623	0.686	1	0.000	43	0.784	0.635	0.699	1	0.000
19	0.826	0.623	0.686	1	0.000	44	0.826	0.623	0.686	1	0.000
20	0.785	0.636	0.697	1	0.000	45	0.826	0.627	0.663	1	0.000
21	0.826	0.623	0.686	1	0.000	46	0.785	0.636	0.697	1	0.000
22	0.825	0.627	0.679	1	0.000	47	0.783	0.641	0.673	1	0.000
23	0.785	0.636	0.697	1	0.000	48	0.785	0.636	0.697	1	0.000
24	0.826	0.623	0.686	1	0.000	49	0.822	0.631	0.673	1	0.000
25	0.785	0.636	0.697	1	0.000	50	0.785	0.636	0.697	1	0.000

De forma semejante a la metodología descrita en el caso de estudio No. 1, se seleccionó el sistema de inferencia generado por el elemento P_1 para el análisis. Este individuo presenta el mayor valor para la distancia hacinamiento.

Las parámetros de las reglas difusas se indican en la Tabla 7.8, en la cual a_1, b_1 son los parámetros para el desplazamiento; a_2, b_2 son los parámetros para la velocidad y a_3, b_3 son los parámetros definidos para el voltaje.

Tabla 7.8.: Parámetros optimizados por el individuo P_1 para el FLC-2

Fuente: Autor

Reglas	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3
Regla 1	0.193	0.789	0.059	-0.700	0.210	2.567
Regla 2	0.100	-0.467	0.210	0.393	0.266	8.856
Regla 3	0.380	0.472	0.210	0.962	0.436	8.828
Regla 4	0.005	0.062	0.177	-0.298	0.478	1.536
Regla 5	0.192	-0.782	0.139	0.371	0.468	0.966
Regla 6	0.193	0.357	0.208	-0.493	0.321	8.459
Regla 7	0.245	0.282	0.067	0.195	0.178	3.662
Regla 8	0.182	0.869	0.014	0.500	0.331	8.068
Regla 9	0.196	-0.784	0.125	0.670	0.141	5.038
Regla 10	0.173	-0.636	0.178	-0.026	0.382	9.141
Regla 11	0.028	0.722	0.070	0.654	0.411	1.695
Regla 12	0.226	0.524	0.166	-0.877	0.341	9.930
Regla 13	0.185	-0.530	0.138	-0.550	0.347	9.912
Regla 14	0.221	-0.686	0.195	-0.143	0.014	0.141
Regla 15	0.224	-0.033	0.222	-0.984	0.115	4.077
Regla 16	0.078	-0.901	0.221	0.912	0.369	0.364
Regla 17	0.018	-0.818	0.098	-0.752	0.403	7.461
Regla 18	0.045	0.188	0.045	-0.058	0.034	4.953
Regla 19	0.241	-0.682	0.101	0.780	0.484	7.604
Regla 20	0.241	0.855	0.127	0.742	0.146	8.553

Las funciones de pertinencia para los parámetros de entrada (desplazamiento y velocidad) y el parámetro de salida (voltaje) se indican en las Figuras 7.37, 7.38 y 7.39, respectivamente.

En la Figura 7.40 se presenta el sistema de inferencia para el controlador FLC-2, mientras que en la Figura 7.41 se esquematiza el diagrama de superficie difusa asociado.

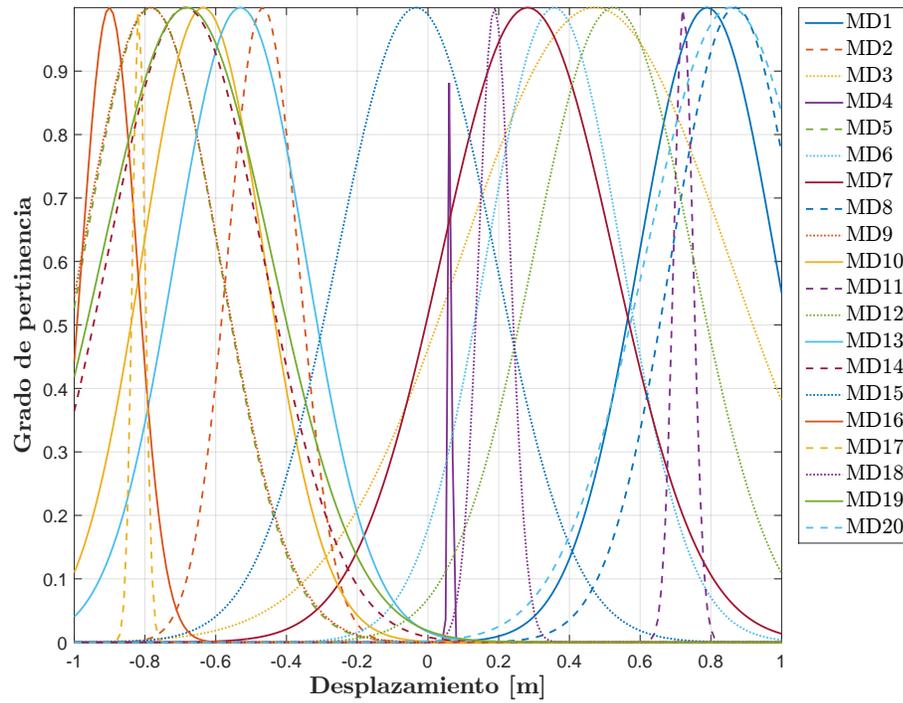


Figura 7.37.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-FLC-2
Fuente: Autor

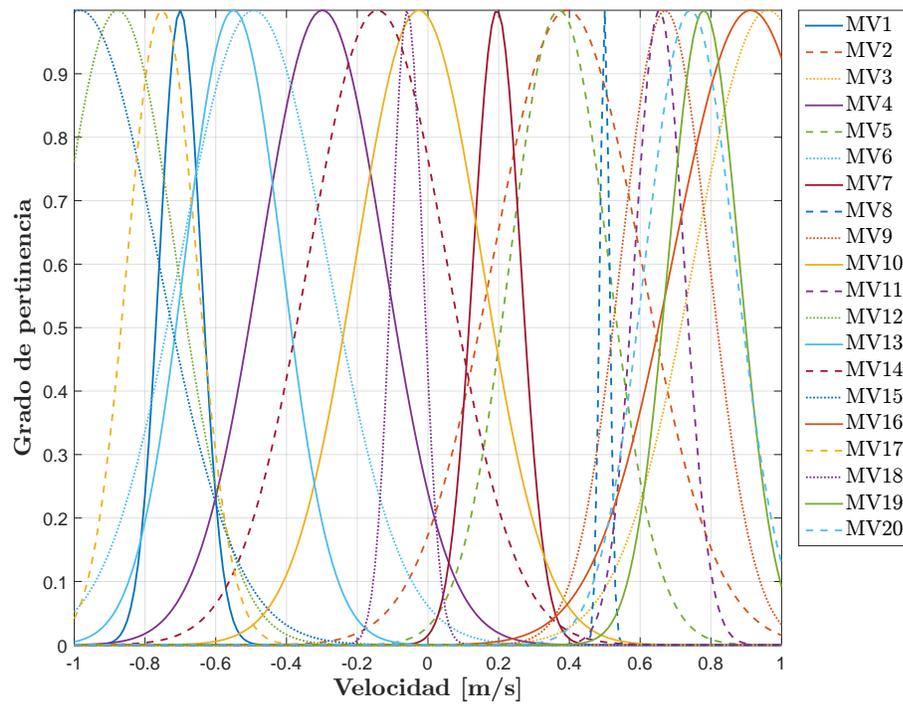


Figura 7.38.: Funciones de pertinencia para la velocidad-FLC-2
Fuente: Autor

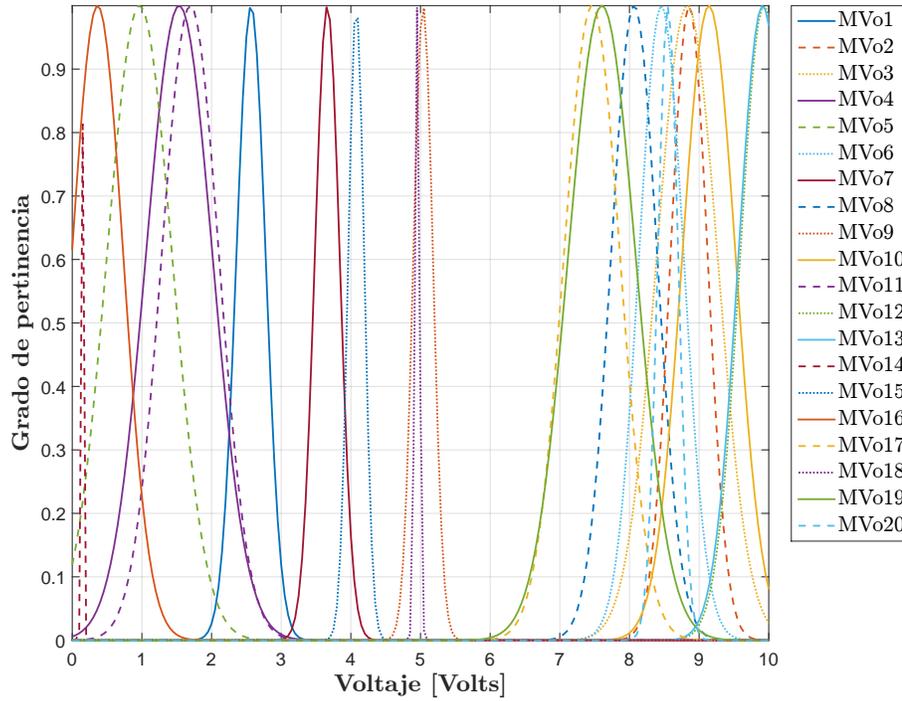


Figura 7.39.: Funciones de pertinencia para el voltaje-FLC-2

Fuente: Autor

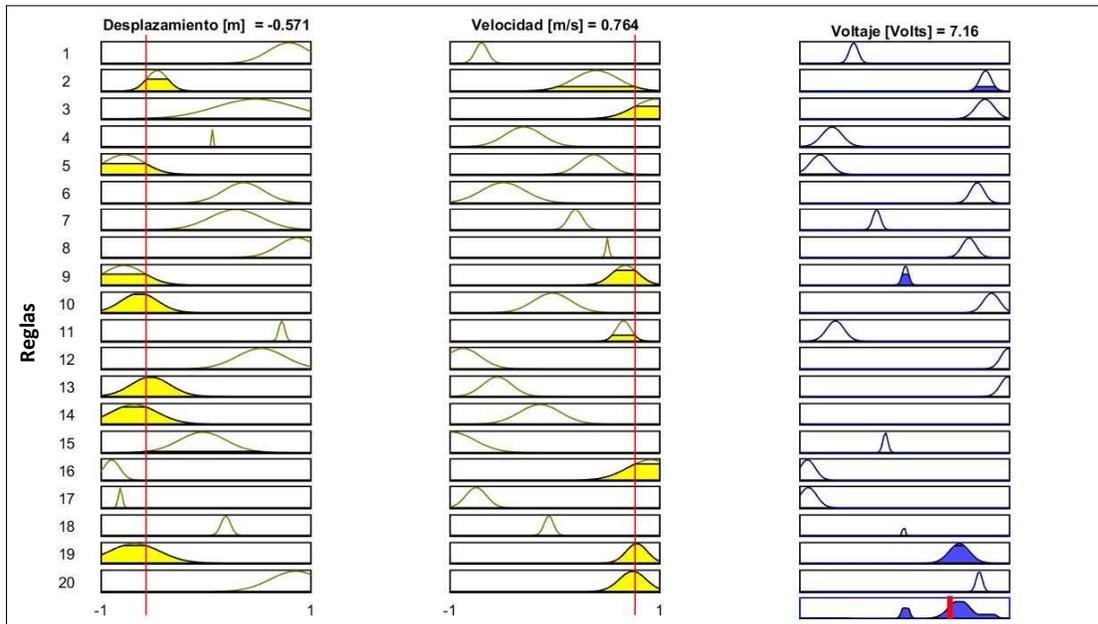


Figura 7.40.: Sistema de inferencia para el controlador FLC-2

Fuente: Autor

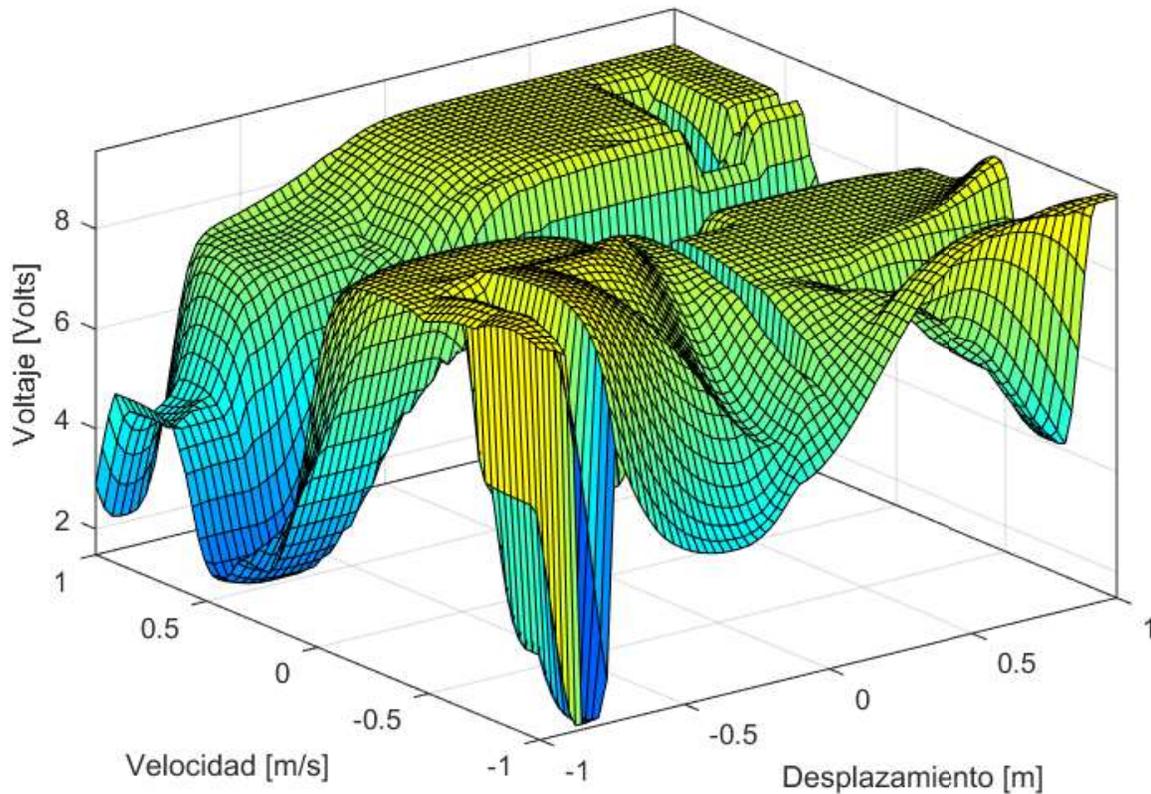


Figura 7.41.: Superficie difusa para el controlador FLC-2
Fuente: Autor

El sistema de inferencia definido para el controlador operado con lógica difusa clásica no depende de las características de la edificación, ya que su configuración es fija y su esquema obedece al conjunto de reglas lingüísticas definidas en la Tabla 4.1.

Teniendo en cuenta esta consideración, para el controlador FLC-1 se empleó el mismo sistema de inferencia y diagrama de superficie con el cual se trabajó la estructura del caso de estudio No. 1 (ver Figuras 7.4 y 7.6 respectivamente).

A continuación se presenta el proceso de evolución para la aptitud de control de los sistemas de inferencia que fueron optimizados por el NSGA-II. La Figura 7.42 compara la variación de las funciones objetivo definidas para cuatro generaciones características del proceso.

En la última generación los individuos de la población convergen en dos regiones características del espacio de soluciones, dentro de las cuales se define el frente de Pareto del problema.

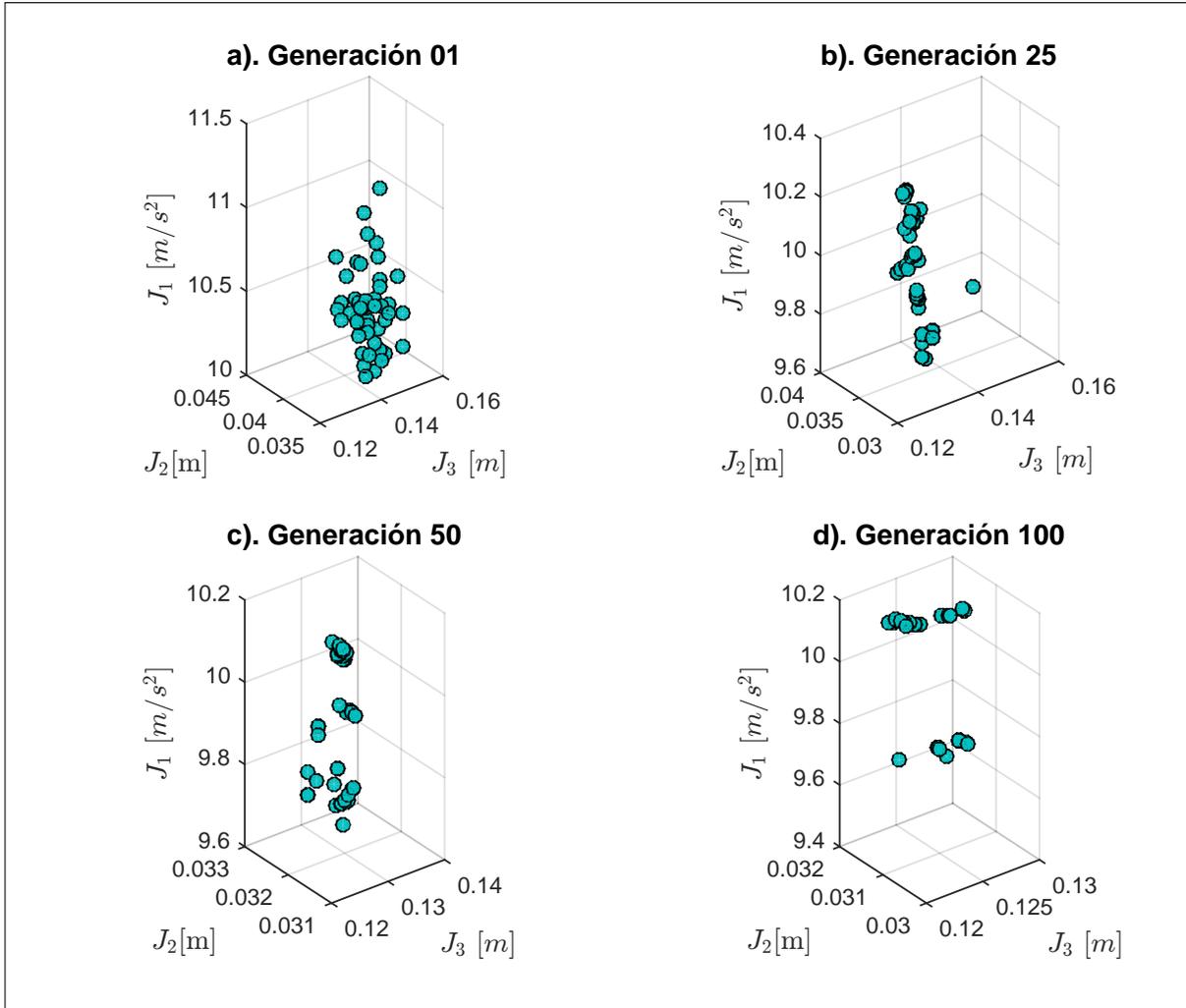


Figura 7.42.: Evolución de los individuos del NSGA-II

Fuente: Autor

Los esquemas presentados en la Figura 7.43 comparan los valores finales de desempeño para los individuos de la última generación de acuerdo con las funciones objetivo del problema.

La Figura 7.43 a). compara la respuesta pico de aceleraciones con el valor RMS máximo de desplazamientos de la estructura. La Figura 7.43 b). relaciona el comportamiento de la respuesta pico de aceleraciones en función de la respuesta pico de desplazamientos y la Figura 7.43 c), compara la respuesta pico de desplazamientos con el valor RMS máximo de desplazamientos.

El individuo P_1 se ha diferenciado de los demás elementos de la población a través de las marcación de color rojo en los esquemas.

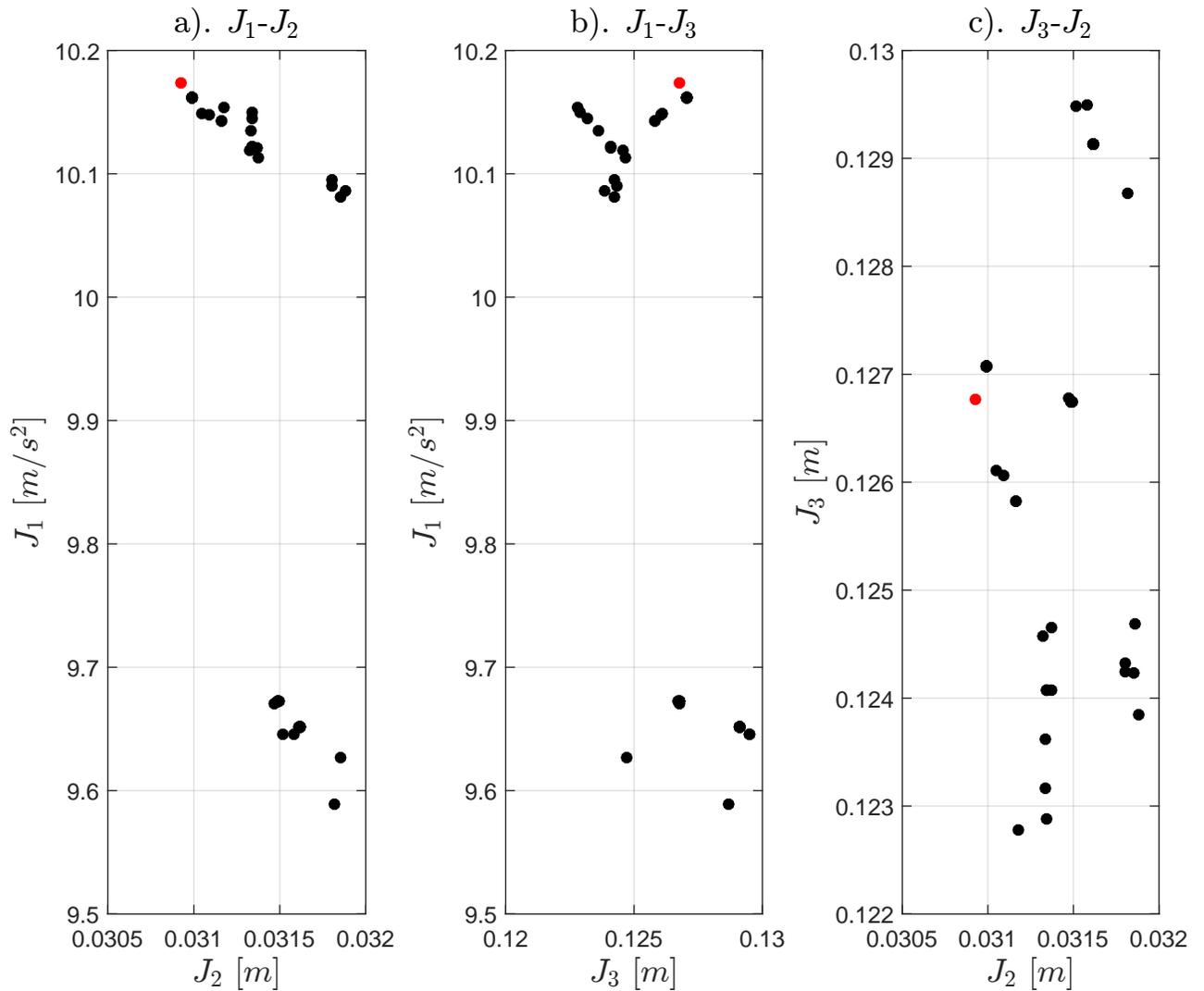


Figura 7.43.: Evolución de los individuos del NSGA-II para la Generación 100

Fuente: Autor

En las Figuras 7.44 y 7.45 se comparan los resultados obtenidos para las funciones de respuesta de desplazamiento del último nivel de la edificación. Estos resultados se presentan para la dirección longitudinal y transversal del sistema, respectivamente.

En la dirección longitudinal (eje X) el FLC-2 reduce los desplazamientos de piso 11 hasta en un 33.4% respecto al caso no controlado y hasta en un 4.60% respecto al FLC-1. En la dirección transversal (eje Y) se presenta un mejor desempeño para el FLC-2, generando un porcentaje de reducción en los desplazamientos de hasta el 10.6% respecto al FLC-1.

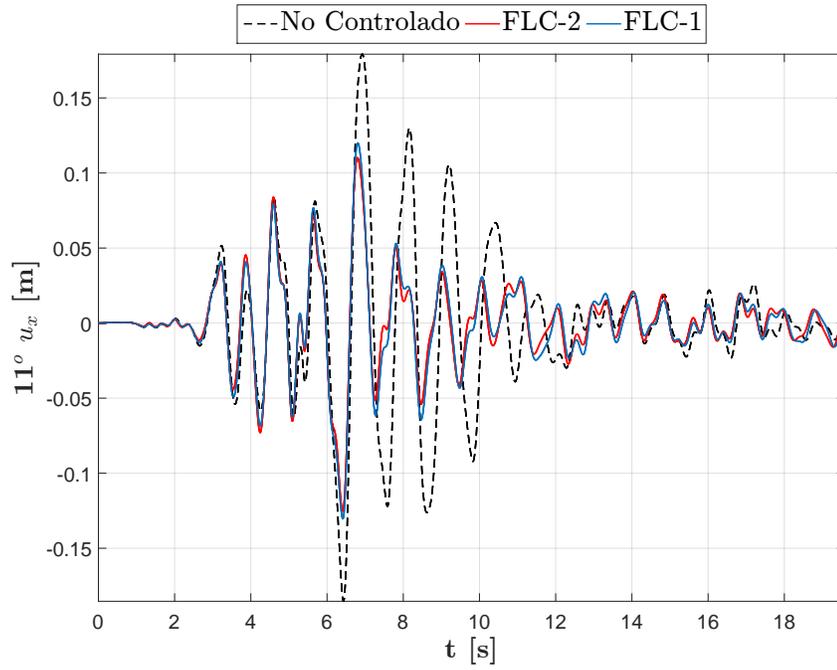


Figura 7.44.: Desplazamiento piso 11_x para el sismo de Loma Prieta
Fuente: Autor

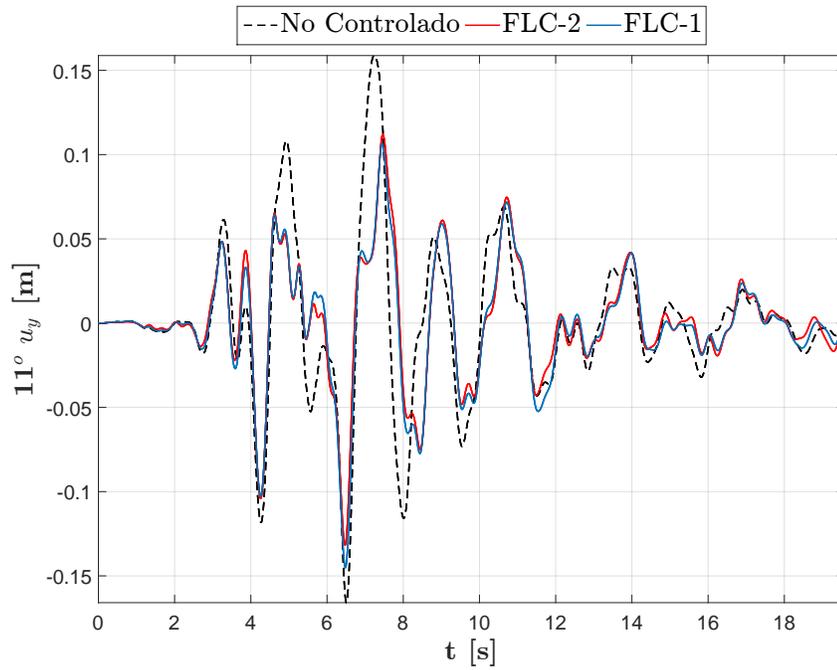


Figura 7.45.: Desplazamiento piso 11_y para el sismo de Loma Prieta
Fuente: Autor

Los esquemas presentados en la Figura 7.46 definen la trayectoria de desplazamiento del piso 11 en el plano XY para esta simulación. De forma conjunta se presentan los radios de desplazamiento máximo medidos desde el origen (posición de equilibrio) hasta los puntos más alejados de las trayectorias. Este análisis se realiza para el caso no controlado (Radio NC), el FLC-1 (Radio FLC-1) y el FLC-2 (Radio FLC-2).

Los resultados muestran que los máximos valores para los radios de desplazamiento del sistema no controlado, el sistema controlado por el FLC-1 y el sistema controlado por el FLC-2 son 0.527 m, 0.393 m y 0.384 m, respectivamente.

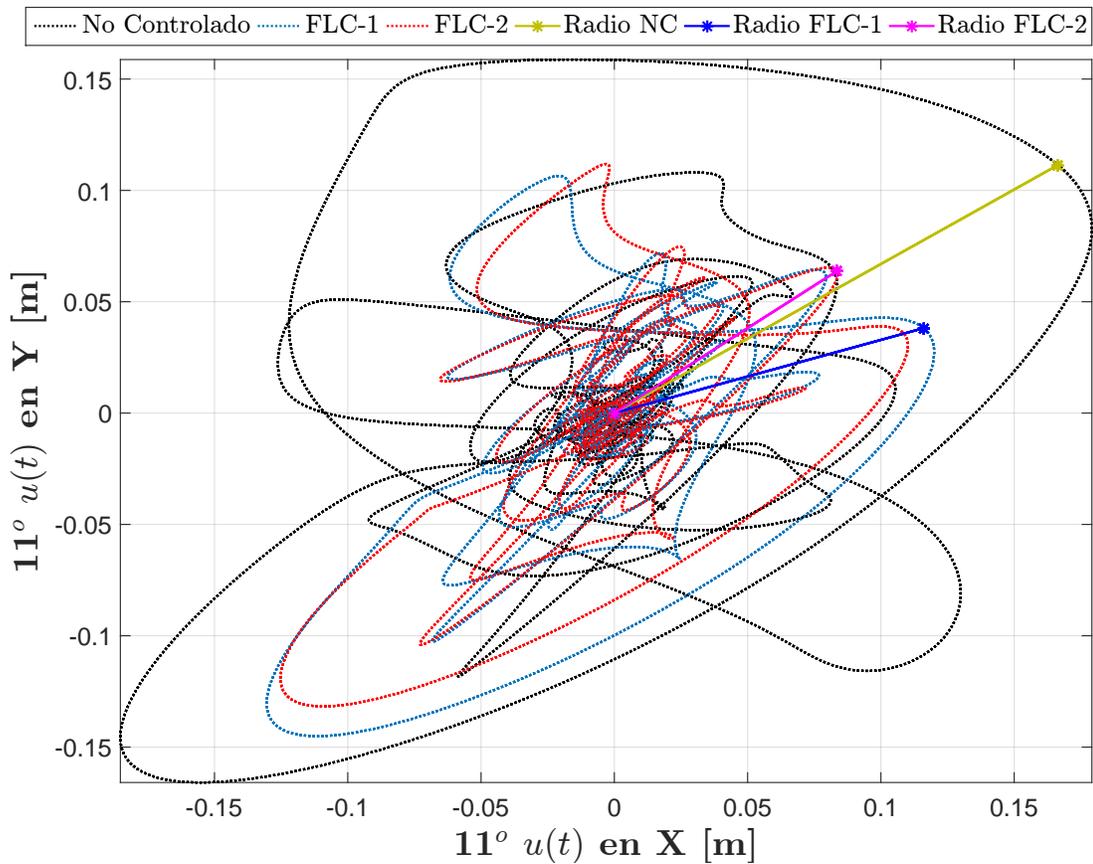


Figura 7.46.: Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Loma Prieta
Fuente: Autor

Similar al caso de estudio No. 1, los ocho amortiguadores MR empleados en las simulaciones fueron calibrados con la misma fuerza de amortiguamiento.

Las curvas características del comportamiento histórico de los dispositivos instalados en el primer piso de la edificación, se indican en las Figuras 7.47 y 7.48. Adicionalmente, en la Figura 7.49 se describe la función de voltaje que proporciona el FLC-2 seleccionado.

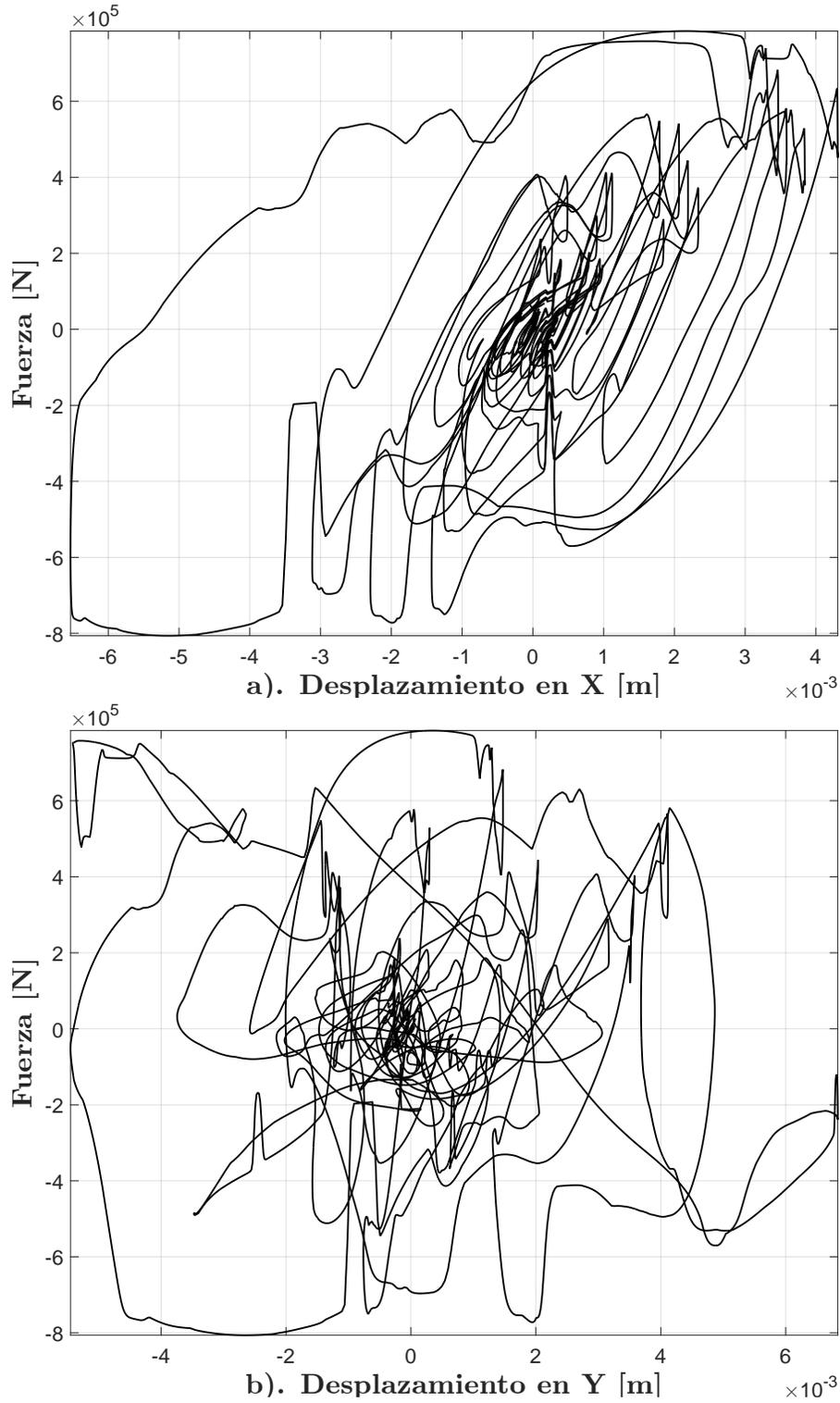


Figura 7.47.: Curvas de histéresis para el ciclo de desplazamiento: a). Dirección X b).
Dirección Y
Fuente: Autor

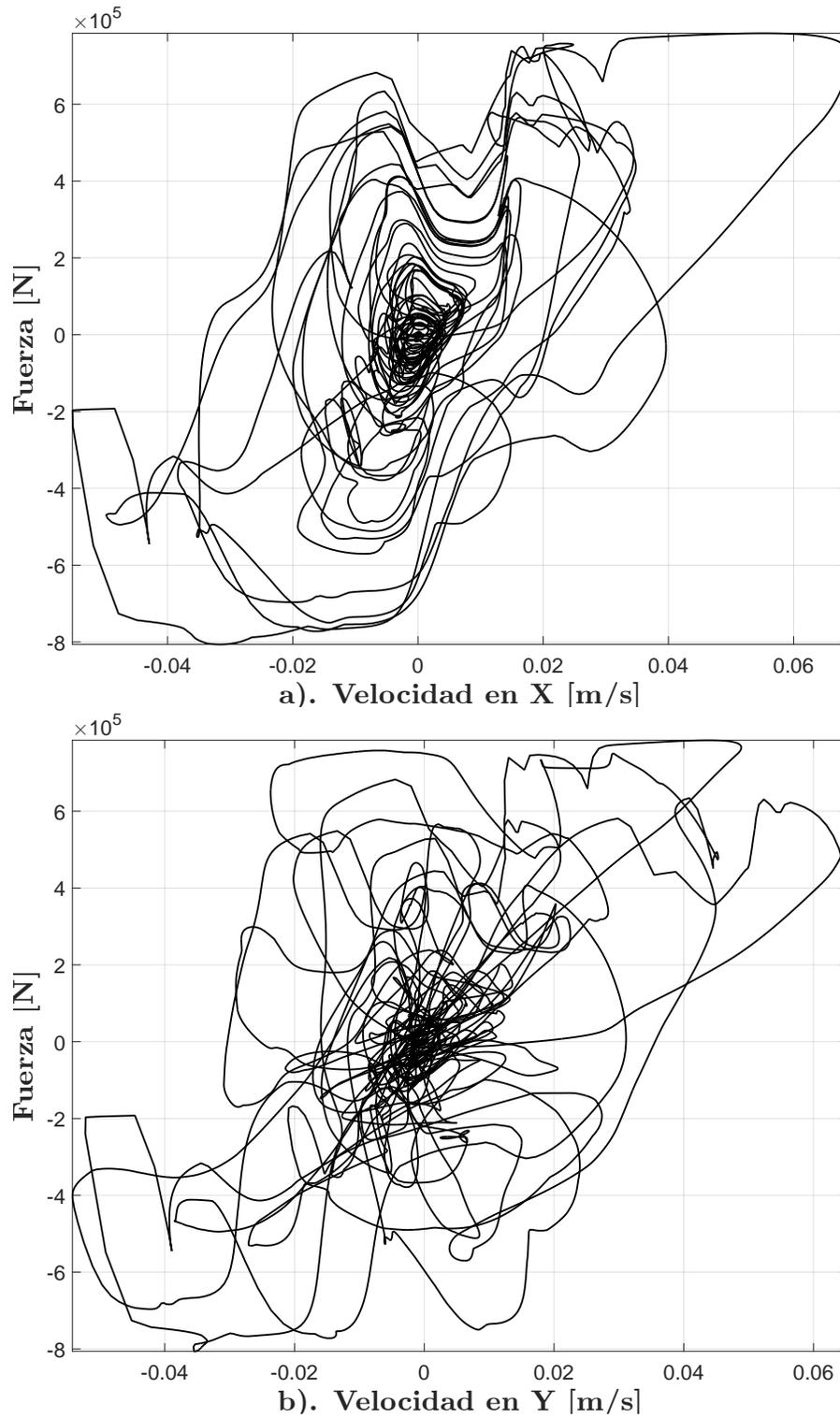


Figura 7.48.: Curvas de histéresis para el ciclo de velocidad: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

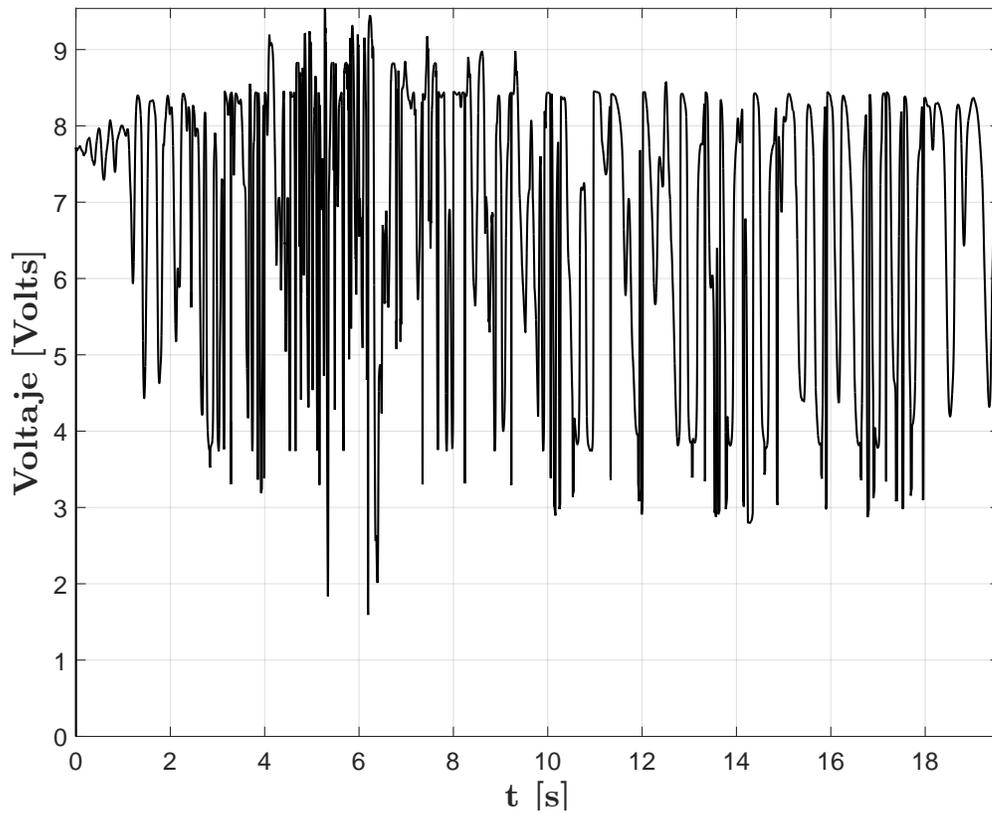


Figura 7.49.: Función de voltaje para los amortiguadores MR

Fuente: Autor

La Figura 7.50 compara los valores RMS de desplazamiento para cada nivel de piso en la dirección longitudinal y transversal del pórtico. En ambos casos se evidencia que los sistemas de control propuestos superan con un margen de diferencia representativo la respuesta alcanzada por el sistema no controlado. El FLC-2 mejora la respuesta RMS de desplazamiento hasta en un 42.4 % en la dirección del eje X y hasta en un 25.7 % en la dirección del eje Y.

Adicionalmente, la Figura 7.51 presenta los resultados para los valores RMS de aceleración de los sistemas de control propuestos y el sistema no controlado de la edificación.

Se observa que los valores RMS de aceleraciones en la dirección del eje Y para el caso del sistema no controlado en los tres últimos niveles, superan levemente los resultados obtenidos por los controladores FLC-1 y FLC-2. La razón de este resultado puede estar vinculada con el hecho de que al generar las fuerzas de control para disminuir los desplazamientos, es posible que dichas fuerzas generen un estado de aceleración en la estructura.

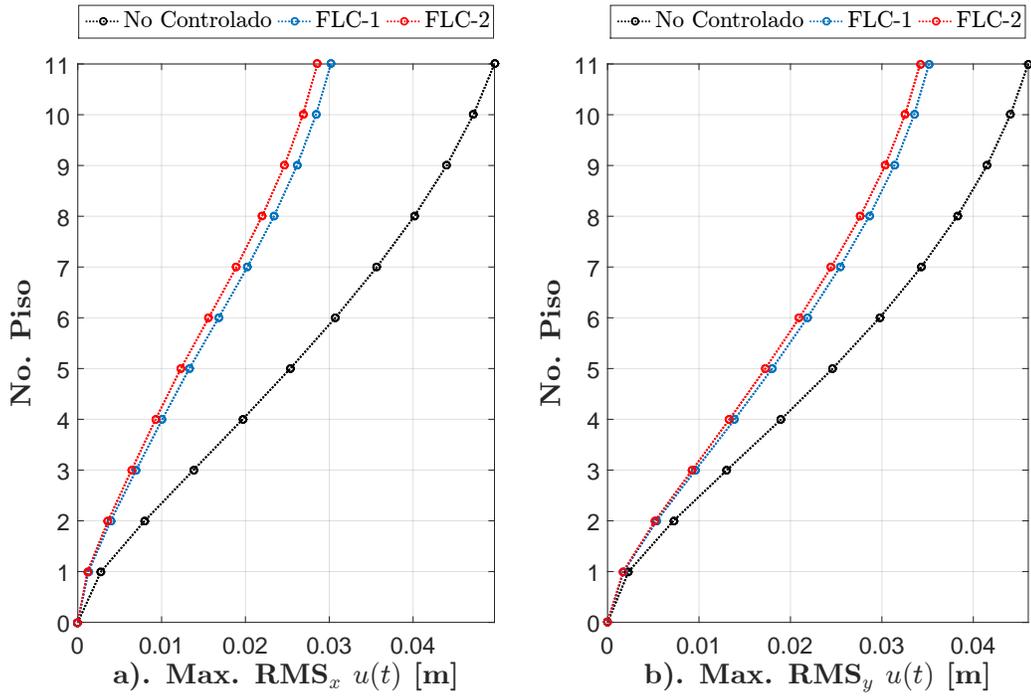


Figura 7.50.: RMS de desplazamientos para Loma Prieta: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

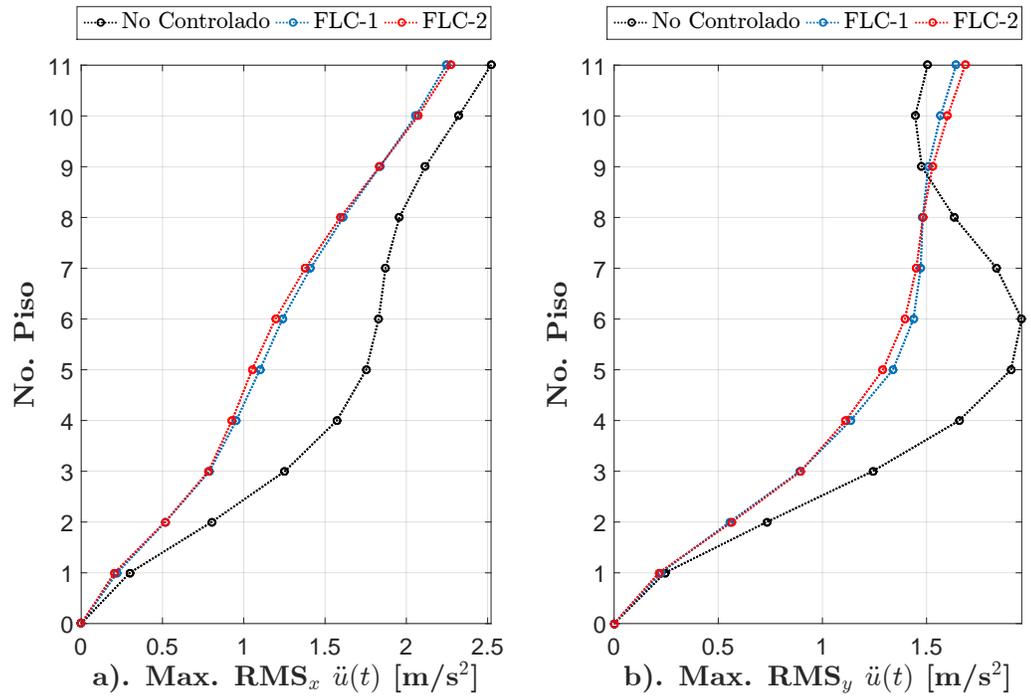


Figura 7.51.: RMS de aceleraciones para Loma Prieta: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

Las gráficas para las derivas máximas de piso en la direcciones principales de la estructura se ilustran en la Figura 7.52. Para el sistema no controlado la deriva máxima en la dirección del eje X es de 0.66 %, mientras que en la dirección del eje Y alcanza un valor de 0.60 %. El controlador FLC-2 reduce estos valores en un 38.8 % en el eje X y en un 20.5 % en el eje Y, respecto al sistema no controlado.

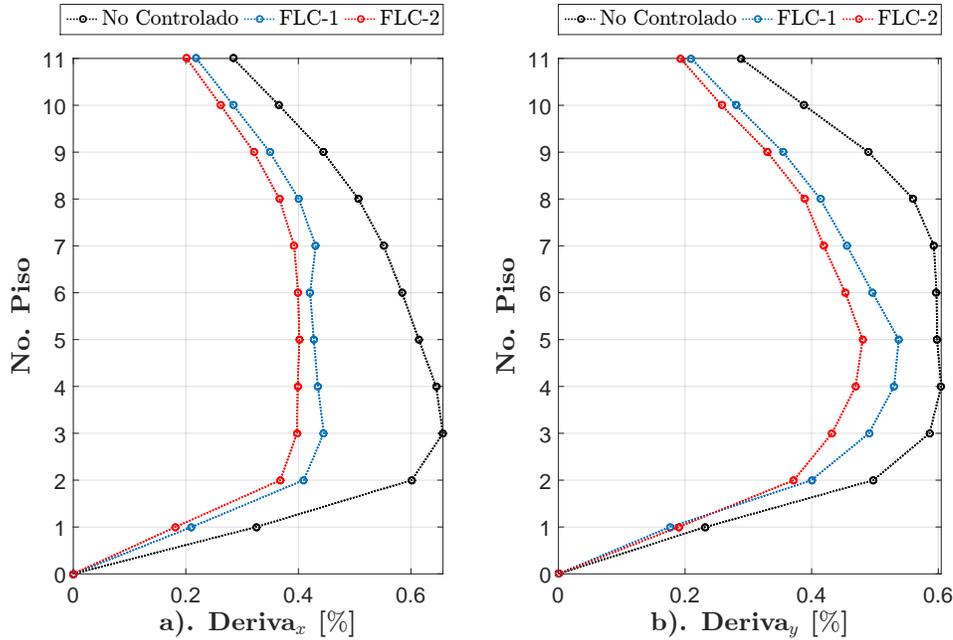


Figura 7.52.: Derivas máximas de piso para Loma Prieta: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

7.2.2. Evaluación general de los controladores

Los resultados obtenidos para las respuestas máximas RMS de desplazamientos y RMS de aceleraciones se indican en las Tablas 7.9, 7.10, 7.11, y 7.12.

Se realiza un análisis de los porcentajes de reducción promedio alcanzados por los controladores para la respuesta RMS de desplazamientos. Respecto al sistema no controlado el FLC-2 mejora un 43.4% en la dirección del eje X y en un 33.6% en la dirección del eje Y. En comparación con los porcentajes promedio de reducción alcanzados por el FLC-1, el FLC-2 mejora esta variable en un 3.7% en eje X y en un 4.4% sobre el eje Y.

Para la respuesta RMS de aceleraciones los porcentajes de reducción promedio muestran que el FLC-1 mejora este parámetro en un 19.8% en la dirección del eje X y en un 15.4% en la dirección del eje Y respecto al sistema no controlado, mientras que el FLC-2 mejora estos valores en un 20.1% sobre eje X y en un 16.2% sobre el eje Y.

Tabla 7.9.: Respuestas RMS máximas de desplazamientos-Dirección X

Fuente: Autor

Max. RMS Desplazamiento en X [m]					
Sismo	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.025	0.015	39.92	0.015	40.02
Morgan Hill	0.051	0.039	23.66	0.038	25.03
Loma Prieta	0.050	0.030	39.28	0.029	42.49
Petrolia	0.027	0.015	44.42	0.014	50.19
Northridge	0.055	0.030	45.01	0.031	43.55
Kobe	0.169	0.087	48.39	0.084	50.47
Nueva Zelanda	0.077	0.045	41.98	0.042	45.53
Italia	0.047	0.025	47.78	0.024	50.20

Tabla 7.10.: Respuestas RMS máximas de desplazamientos-Dirección Y

Fuente: Autor

Max. RMS Desplazamiento en Y [m]					
Sismo	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.033	0.019	41.52	0.019	41.45
Morgan Hill	0.054	0.047	12.35	0.041	23.19
Loma Prieta	0.046	0.035	23.54	0.034	25.71
Petrolia	0.060	0.036	40.03	0.033	45.50
Northridge	0.088	0.058	34.91	0.062	29.72
Kobe	0.223	0.179	19.88	0.162	27.32
Nueva Zelanda	0.106	0.064	39.14	0.059	43.85
Italia	0.054	0.037	30.78	0.037	32.17

Tabla 7.11.: Respuestas RMS máximas de aceleraciones-Dirección X

Fuente: Autor

Max. RMS aceleraciones en X [m/s²]					
Sismo	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.980	0.857	12.55	0.844	13.91
Morgan Hill	2.162	1.957	9.48	1.969	8.95
Loma Prieta	2.521	2.245	10.95	2.271	9.90
Petrolia	1.079	0.872	19.17	0.876	18.80
Northridge	2.797	2.488	11.05	2.480	11.33
Kobe	4.893	2.675	45.33	2.593	47.00
Nueva Zelanda	2.300	1.632	29.06	1.617	29.71
Italia	2.071	1.624	21.56	1.625	21.54

Tabla 7.12.: Respuestas RMS máximas de aceleraciones-Dirección Y

Fuente: Autor

Max. RMS aceleraciones en Y [m/s²]					
Sismo	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.84	0.788	6.18	0.775	7.75
Morgan Hill	1.643	1.601	2.57	1.618	1.53
Loma Prieta	1.957	1.641	16.12	1.685	13.87
Petrolia	1.169	0.888	24.00	0.868	25.74
Northridge	2.371	2.206	6.99	2.205	7.00
Kobe	3.969	2.984	24.82	2.736	31.08
Nueva Zelanda	2.091	1.400	33.06	1.412	32.48
Italia	1.763	1.590	9.77	1.588	9.89

Las Tablas 7.13 y 7.14 comparan los resultados obtenidos para las derivas máximas de piso en las direcciones X e Y, respectivamente. Este análisis se realiza para los sistemas no controlados y los sistemas FLC-1 y FLC-2.

Los valores obtenidos indican que el FLC-1 mejora en promedio la derivas respecto al sistema no controlado en un 24.2% en la dirección del eje X y en un 23.0% en la dirección del eje Y. Para el caso del FLC-2 hay un porcentaje de reducción promedio del 27.1% sobre el eje X y un 26.8% sobre el eje Y, respecto al sistema no controlado.

En comparación con los resultados obtenidos para el FLC-1, el FLC-2 mejora en promedio las derivas máximas de piso en un 4.0% en la dirección del eje X y en un 4.7% en la dirección del eje Y.

Tabla 7.13.: Derivas máximas de piso-Dirección X

Fuente: Autor

Max. Derivas de piso en X [%]					
Sismo	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.242	0.202	16.54	0.193	20.28
Morgan Hill	0.748	0.602	19.57	0.616	17.74
Loma Prieta	0.657	0.445	32.25	0.402	38.84
Petrolia	0.321	0.244	24.10	0.233	27.46
Northridge	0.741	0.649	12.41	0.645	12.98
Kobe	1.893	1.186	37.37	1.086	42.62
Nueva Zelanda	0.983	0.670	31.86	0.648	34.06
Italia	0.561	0.450	19.80	0.435	22.57

Tabla 7.14.: Derivas máximas de piso-Dirección Y
Fuente: Autor

Max. Derivas de piso en Y [%]					
Sismo	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.393	0.223	43.18	0.213	45.64
Morgan Hill	0.759	0.593	21.85	0.593	21.81
Loma Prieta	0.605	0.538	11.09	0.481	20.51
Petrolia	0.512	0.361	29.48	0.340	33.68
Northridge	1.073	0.753	29.79	0.771	28.08
Kobe	2.351	2.008	14.60	1.836	21.94
Nueva Zelanda	1.058	0.858	18.92	0.781	26.15
Italia	0.626	0.530	15.39	0.521	16.80

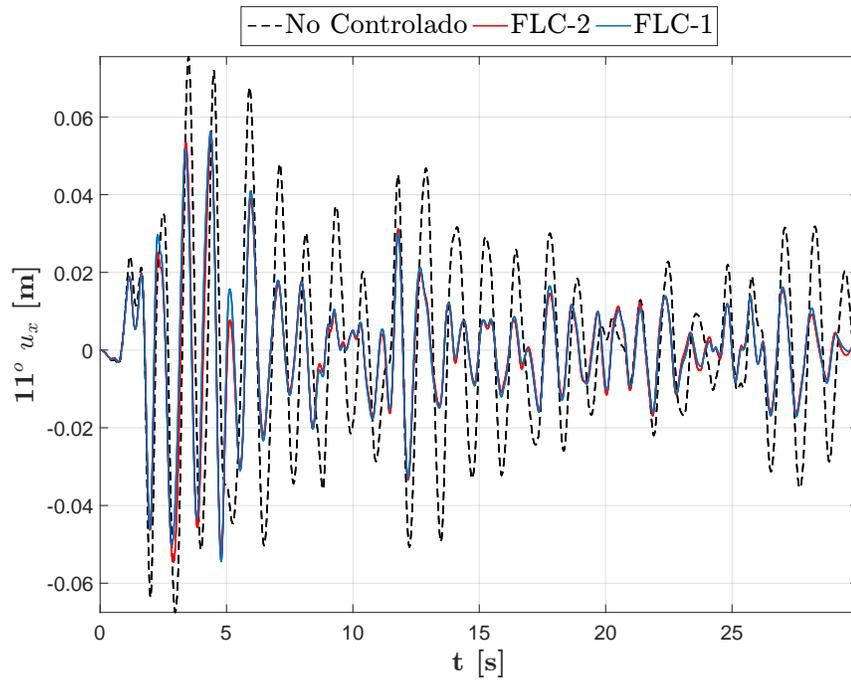
Los índices de desempeño para los sistemas de inferencia con mayor nivel de aptitud calculados por el NSGA-II se indican en la Tabla 7.6. Los mejores resultados para la respuesta pico de aceleraciones están en el sismo de Kobe ($J_1=0.626$), para la respuesta RMS de desplazamientos en el sismo de Italia ($J_2=0.493$) y para la respuesta pico de desplazamientos en el sismo de El Centro ($J_3=0.526$).

Tabla 7.15.: Criterios de desempeño para el controlador FLC-2
Fuente: Autor

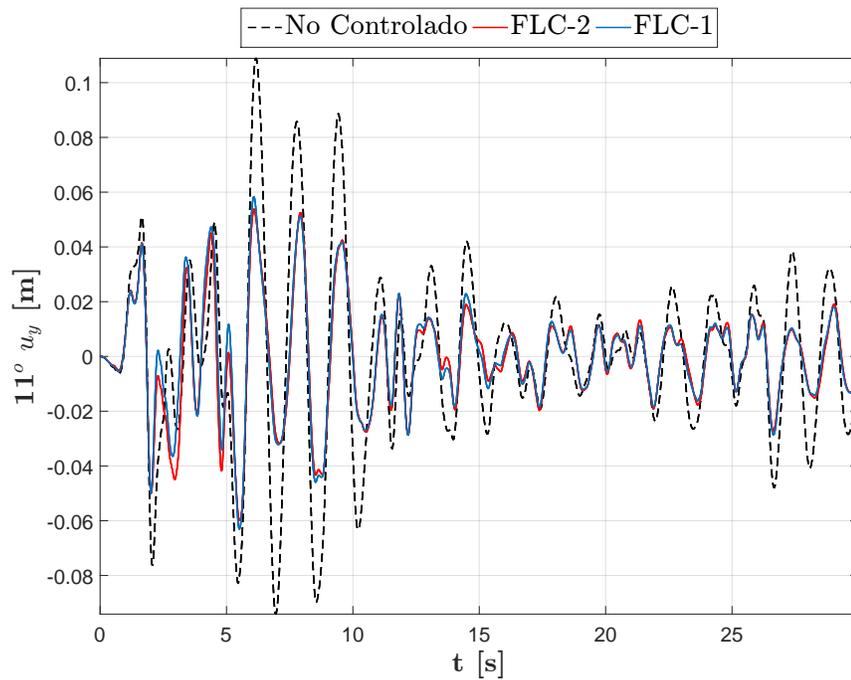
Sismo	Funciones objetivo		
	J₁	J₂	J₃
El Centro	0.813	0.570	0.526
Morgan Hill	0.868	0.769	0.758
Loma Prieta	0.827	0.622	0.684
Petrolia	0.823	0.516	0.644
Northridge	0.945	0.670	0.682
Kobe	0.626	0.713	0.759
Nueva Zelanda	0.849	0.544	0.655
Italia	0.858	0.493	0.702
Promedio	0.826	0.612	0.676

Nota: El valor más bajo es un indicador de mayor rendimiento.

Desde la Figura 7.53 hasta la Figura 7.66 se presentan las respuestas de desplazamientos para el nivel 11 de la edificación de los sismos que no se analizaron en el caso particular de la sección 7.2.1. De igual manera las gráficas para las respuestas RMS de desplazamientos, RMS de aceleraciones y derivas máximas de piso, se indican desde la Figura 7.67 hasta la Figura 7.87.

Figura 7.53.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -El Centro

Fuente: Autor

Figura 7.54.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -El Centro

Fuente: Autor

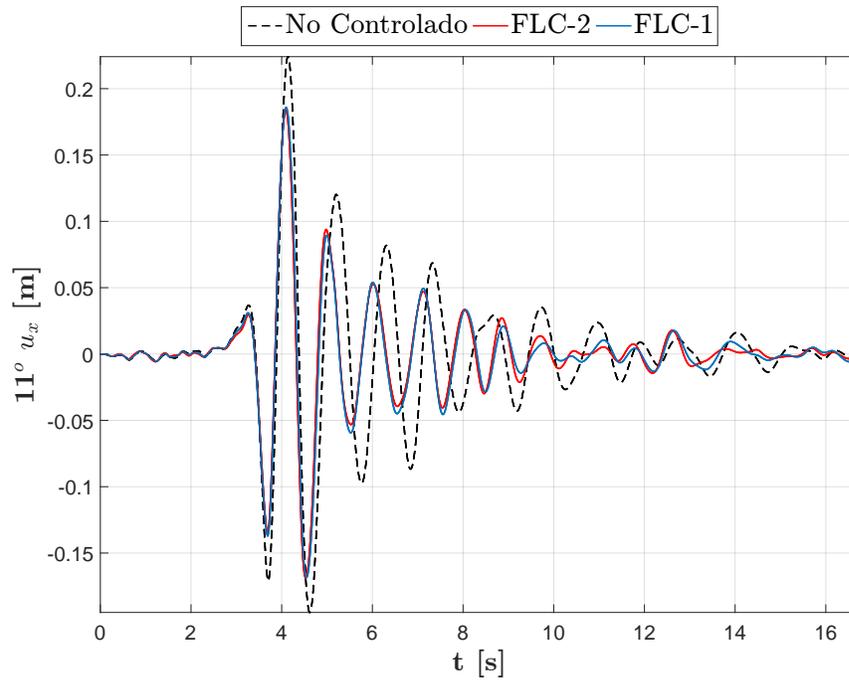


Figura 7.55.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x-Morgan Hill
Fuente: Autor

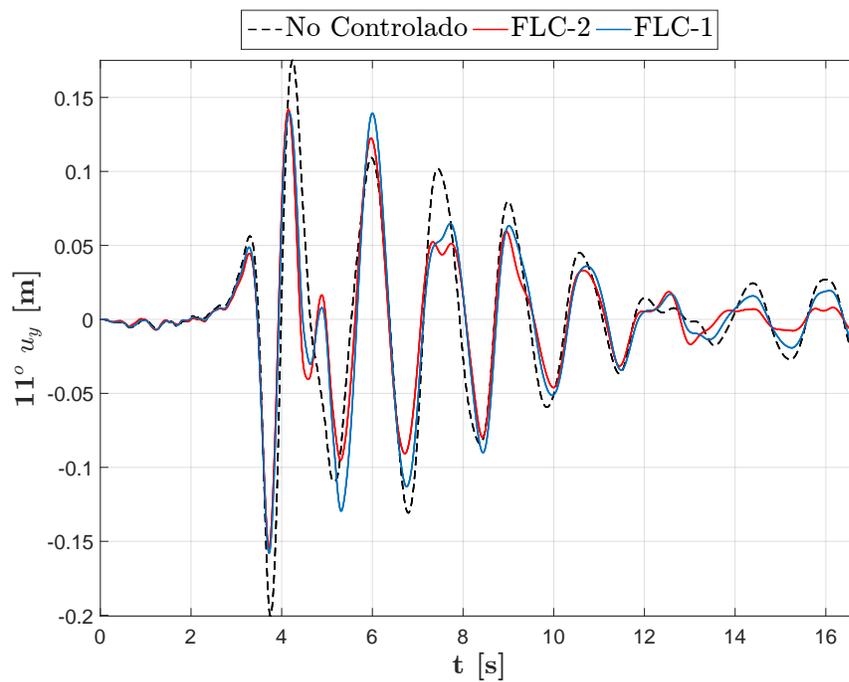


Figura 7.56.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y-Morgan Hill
Fuente: Autor

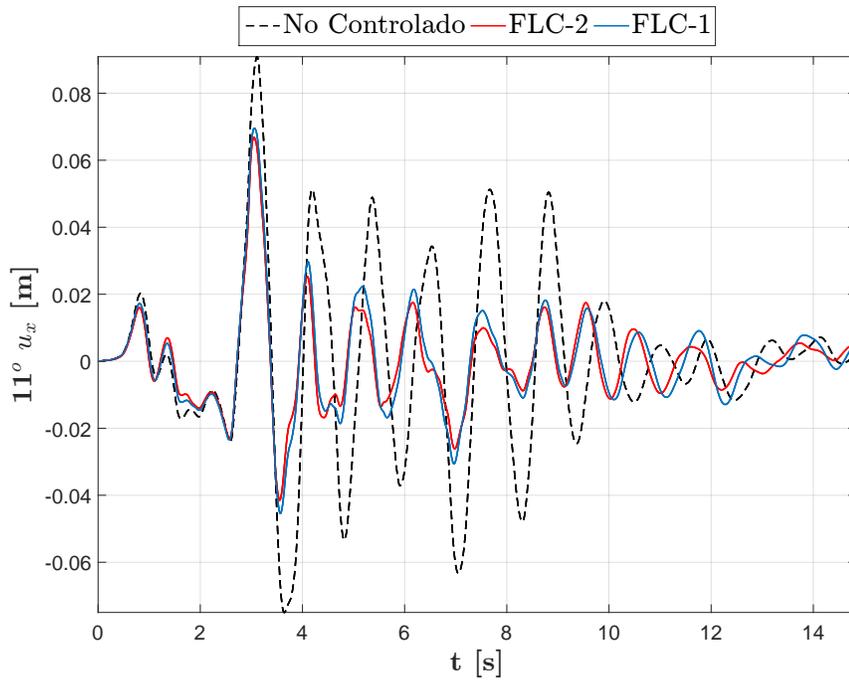


Figura 7.57.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Petrolia
Fuente: Autor

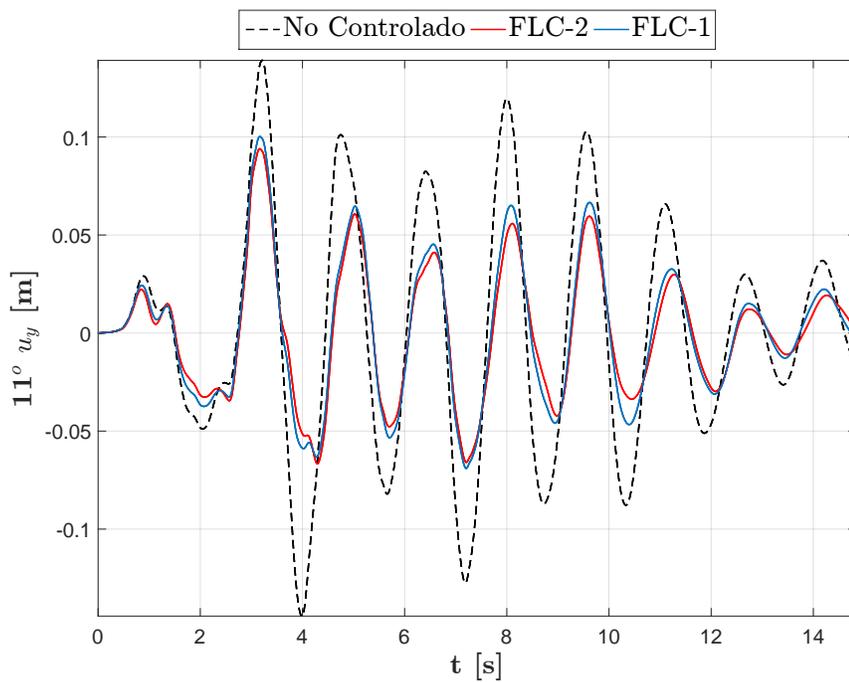


Figura 7.58.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Petrolia
Fuente: Autor

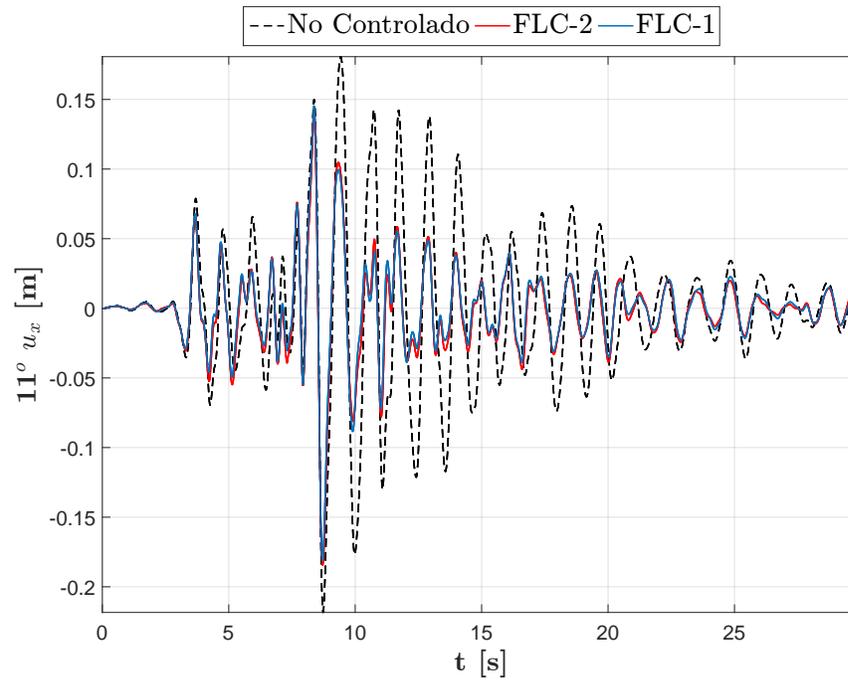


Figura 7.59.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x-Northridge
Fuente: Autor

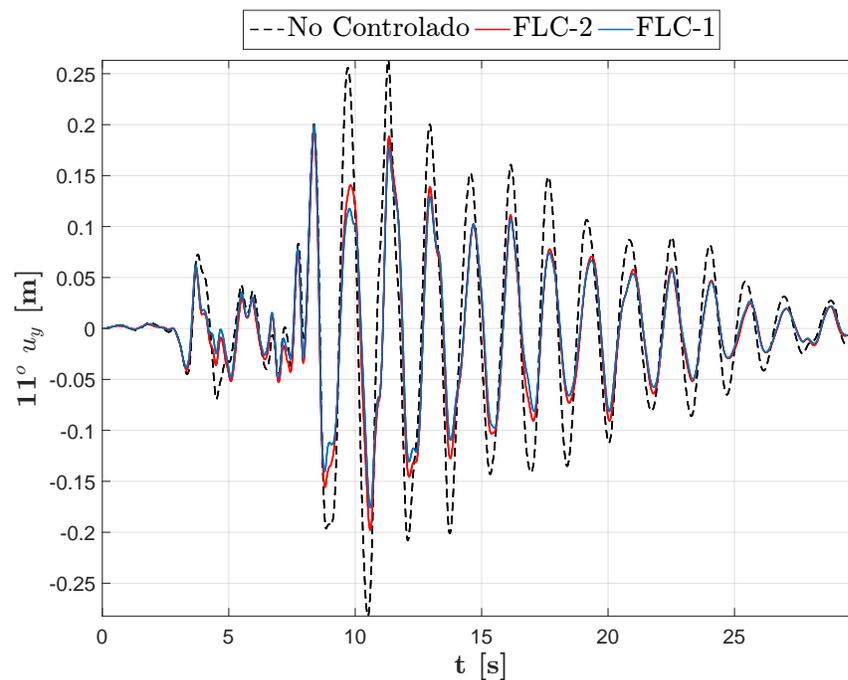


Figura 7.60.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y-Northridge
Fuente: Autor

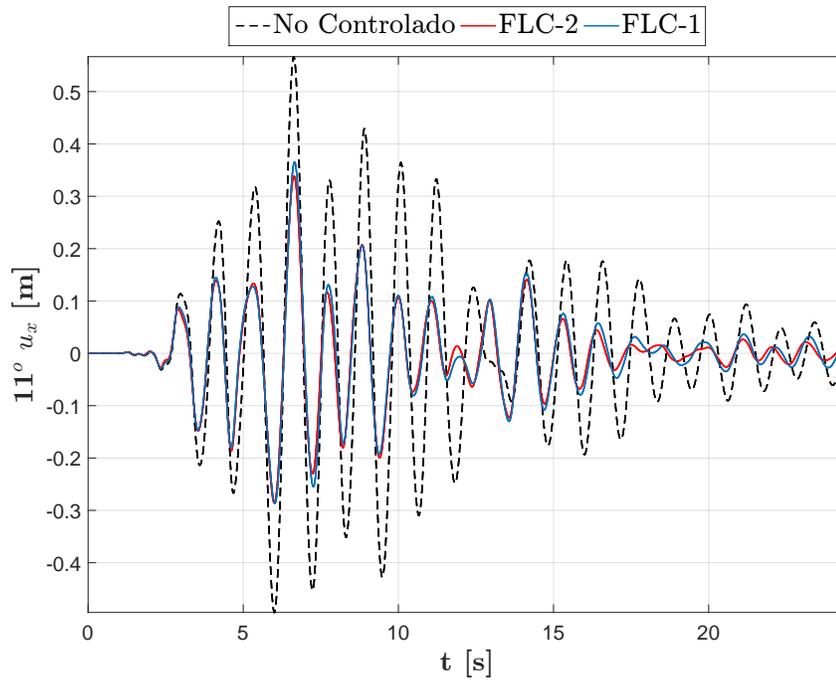


Figura 7.61.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Kobe
Fuente: Autor

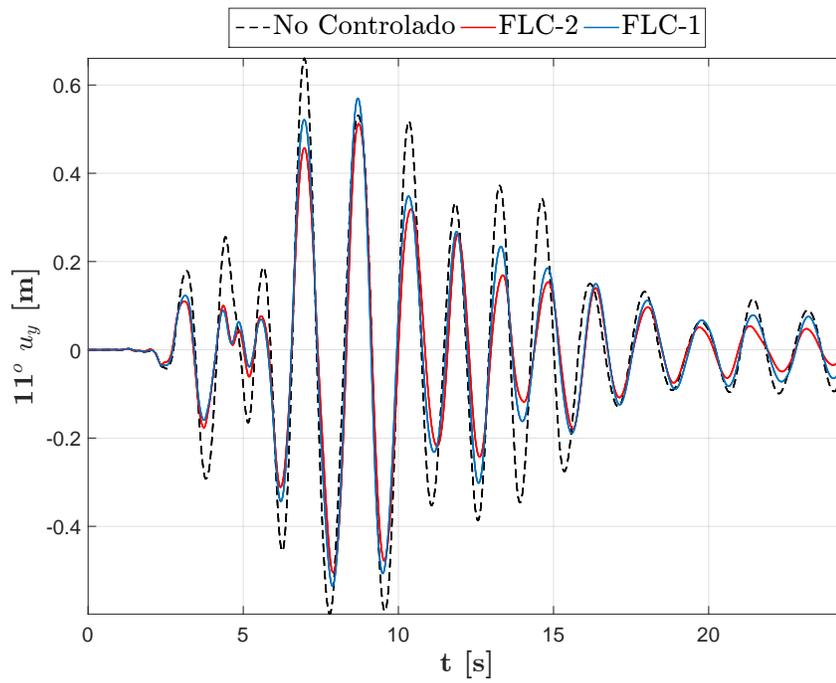


Figura 7.62.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Kobe
Fuente: Autor

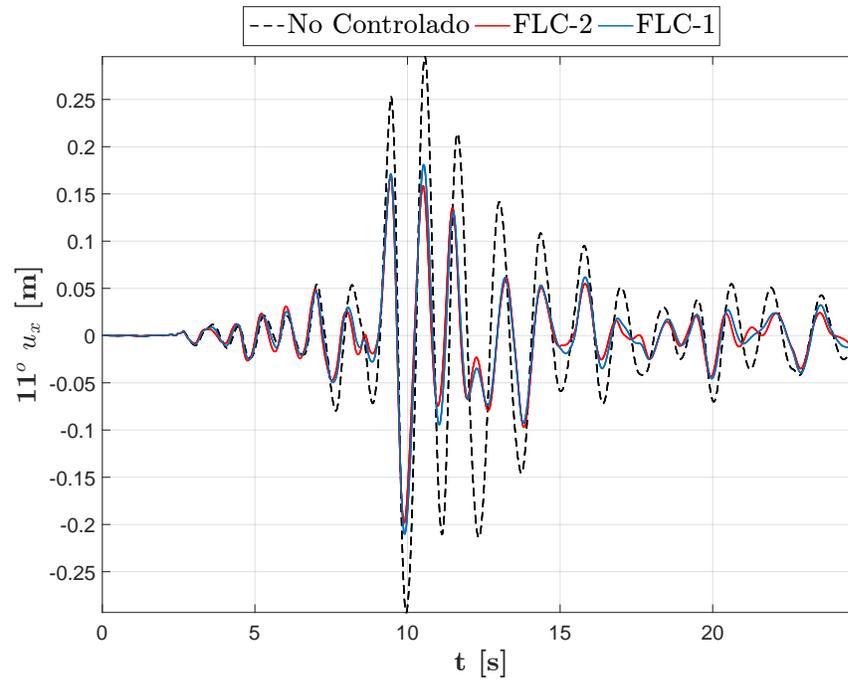


Figura 7.63.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Nueva Zelanda
Fuente: Autor

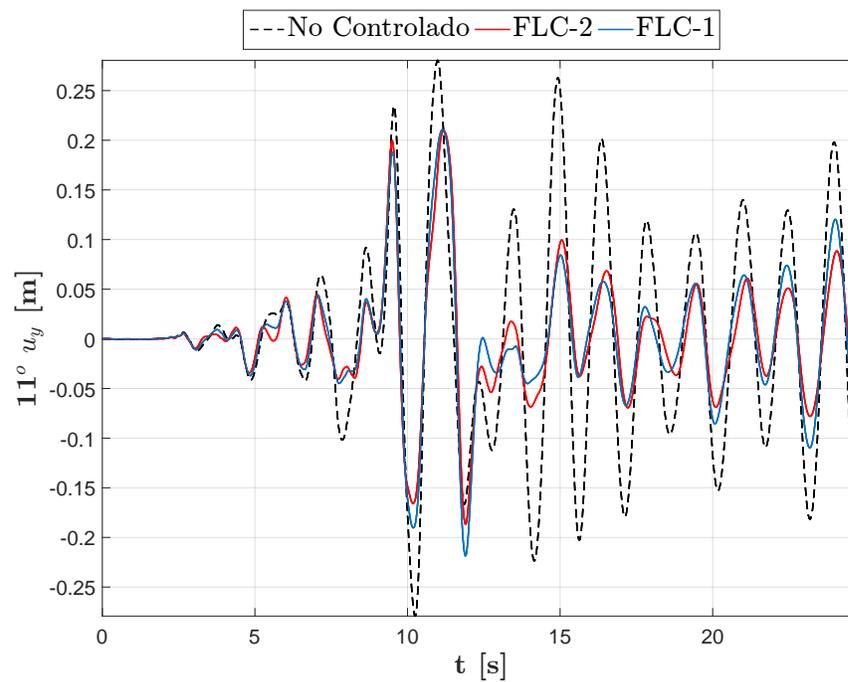


Figura 7.64.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Nueva Zelanda
Fuente: Autor

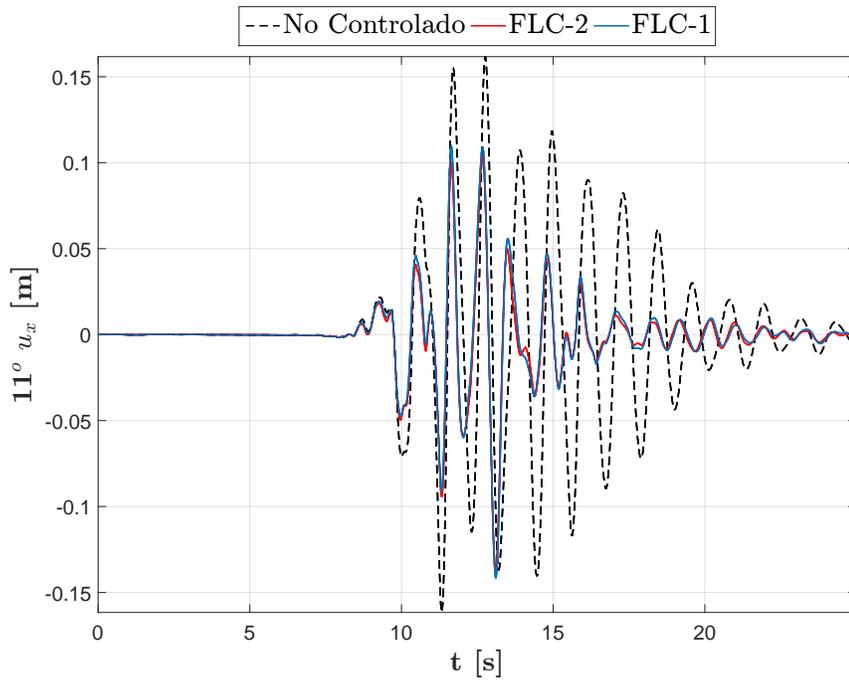


Figura 7.65.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_x -Italia
Fuente: Autor

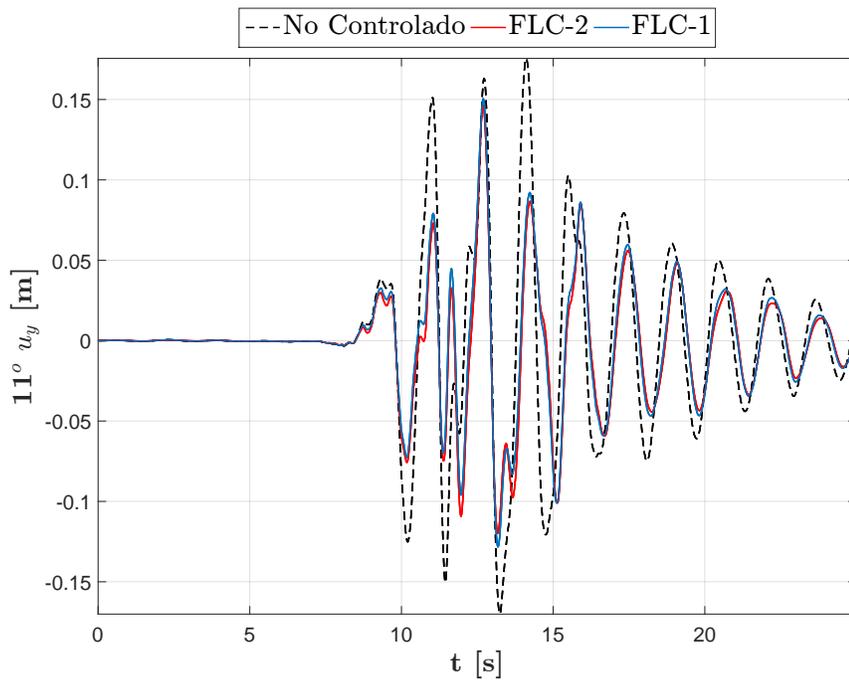


Figura 7.66.: Respuesta de desplazamiento para el nivel de piso 11_y -Italia
Fuente: Autor

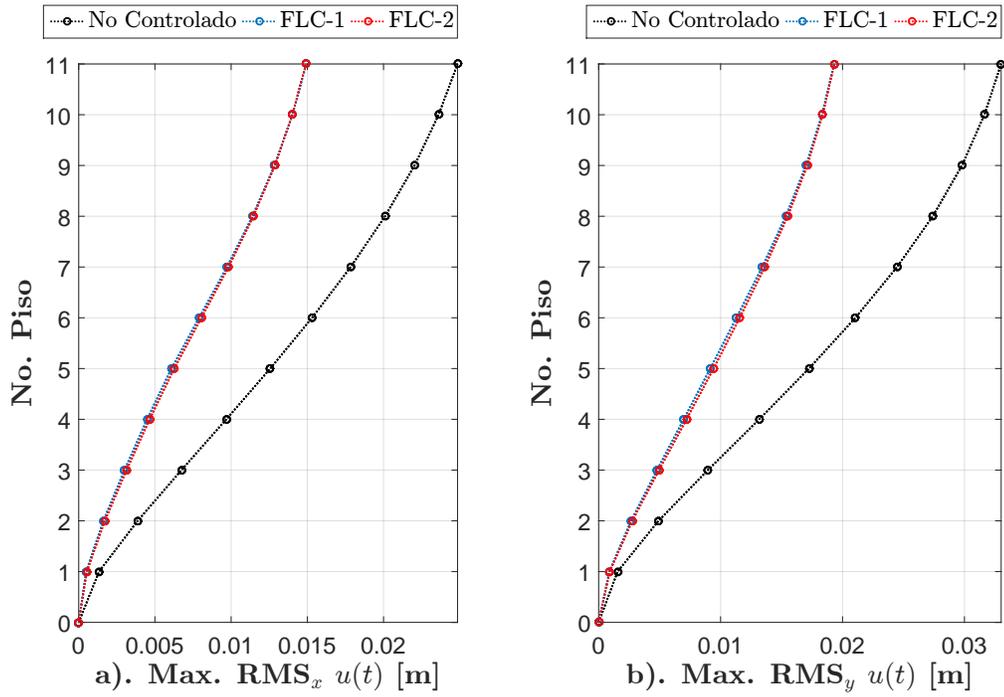


Figura 7.67.: RMS de desplazamientos-El Centro: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

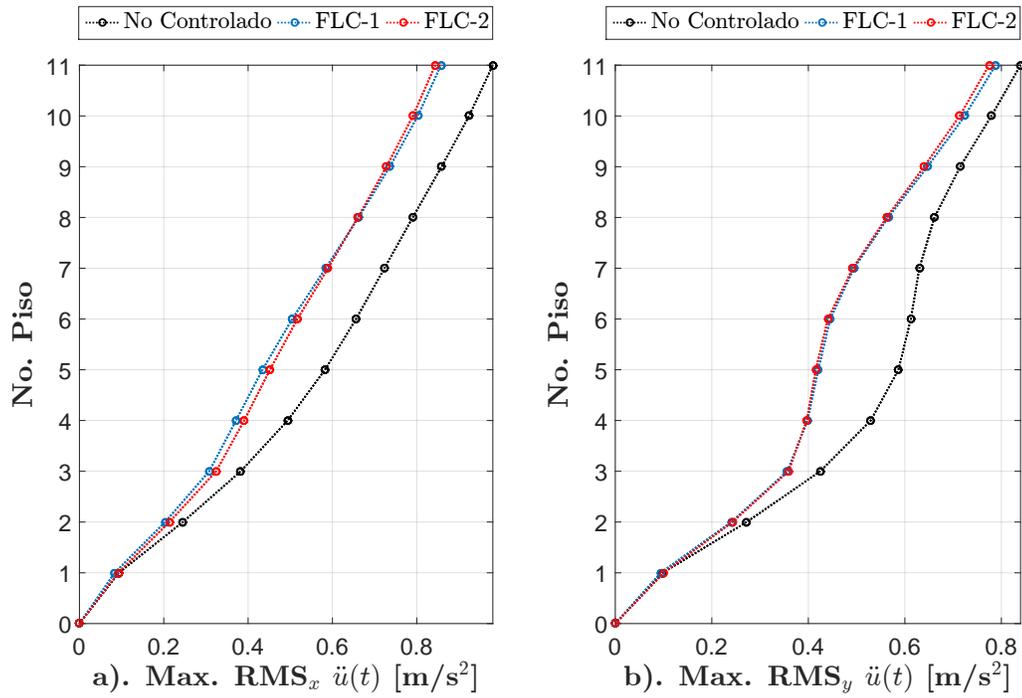


Figura 7.68.: RMS de aceleraciones-El Centro: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

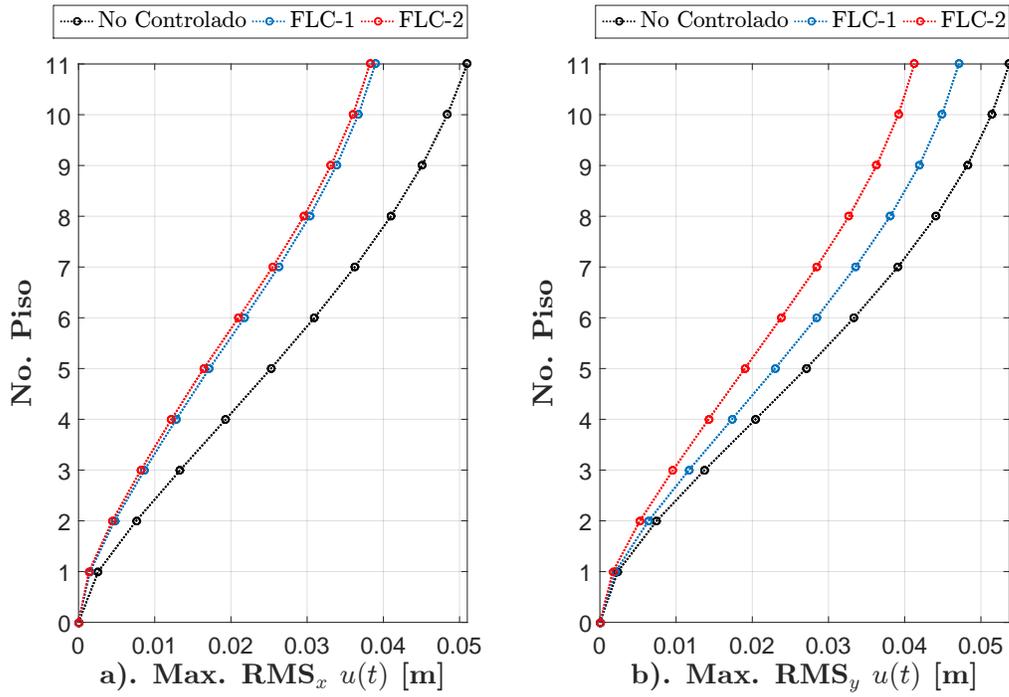


Figura 7.69.: RMS de desplazamientos-Morgan Hill: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

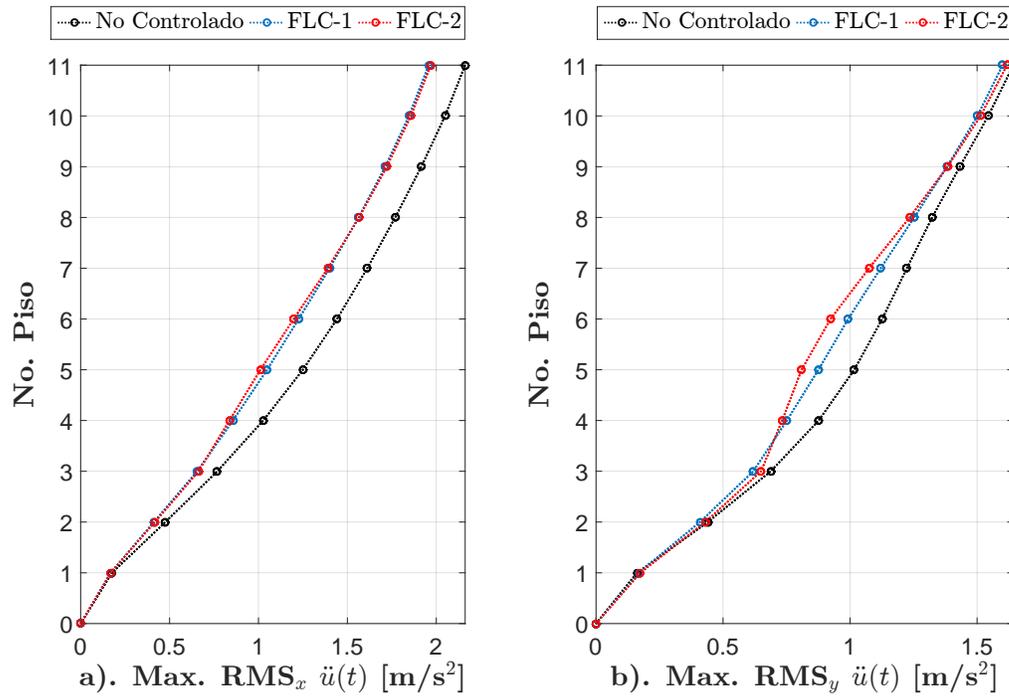


Figura 7.70.: RMS de aceleraciones-Morgan Hill: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

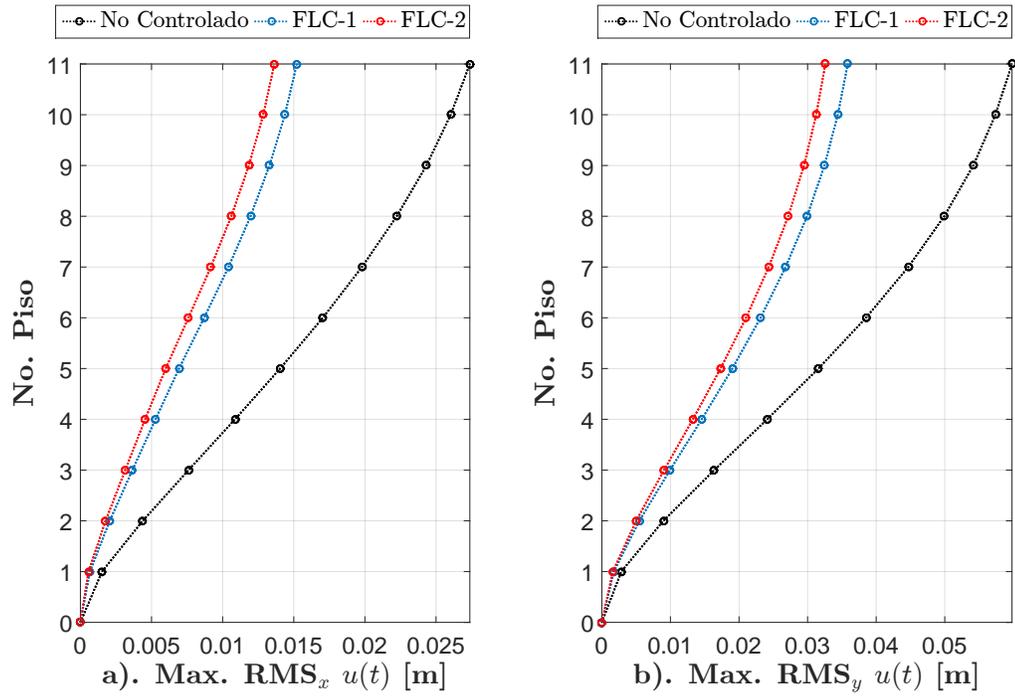


Figura 7.71.: RMS de desplazamientos-Petrolia: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

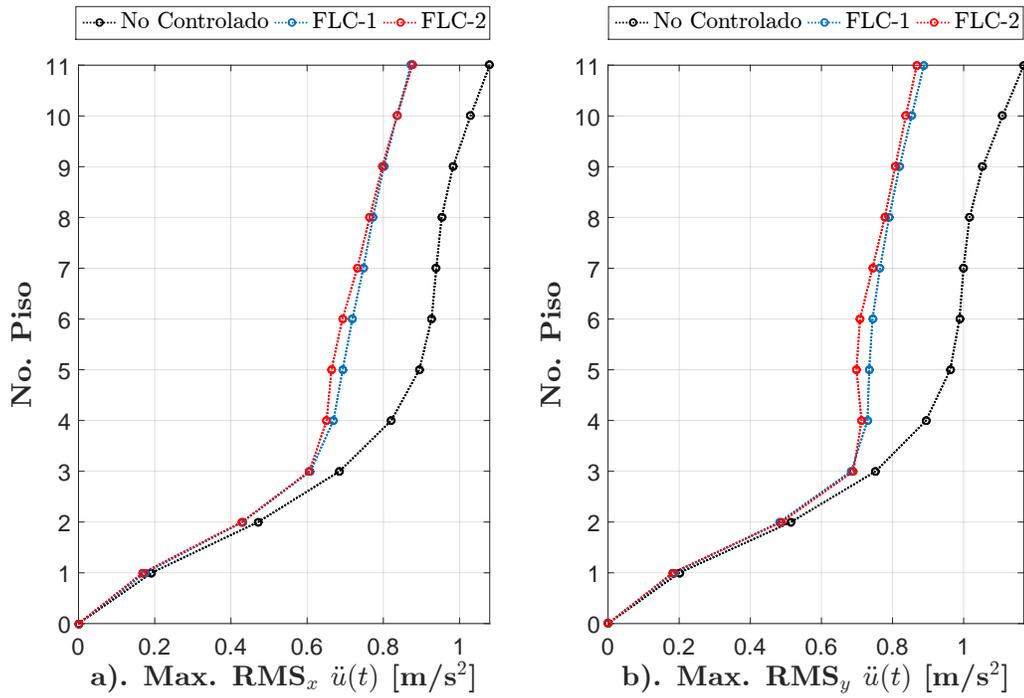


Figura 7.72.: RMS de aceleraciones-Petrolia: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

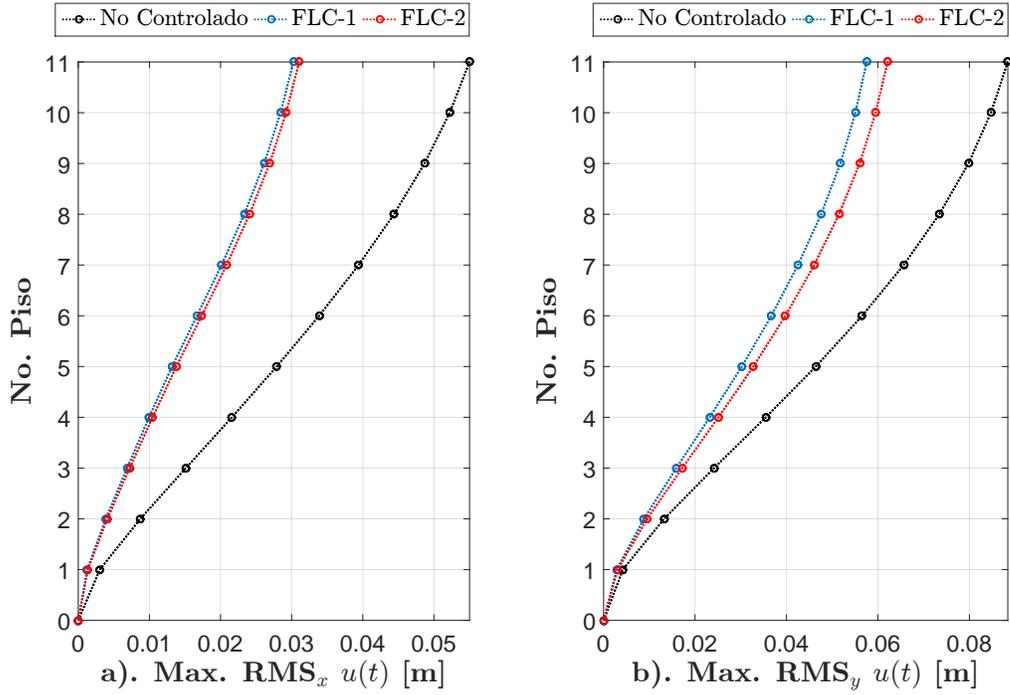


Figura 7.73.: RMS de desplazamientos-Northridge: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

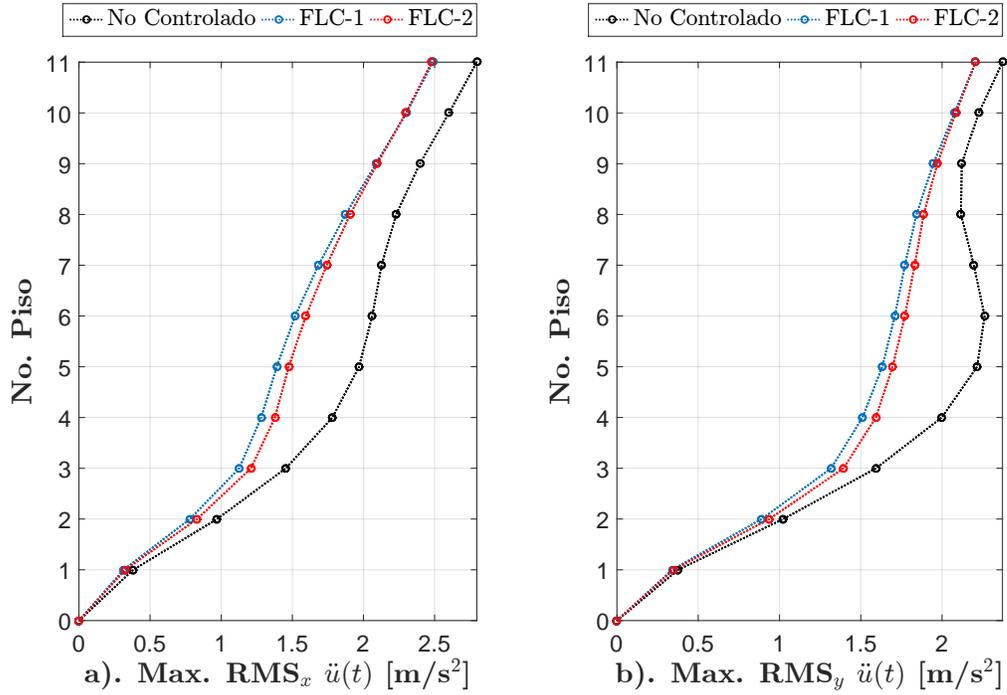


Figura 7.74.: RMS de aceleraciones-Northridge: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

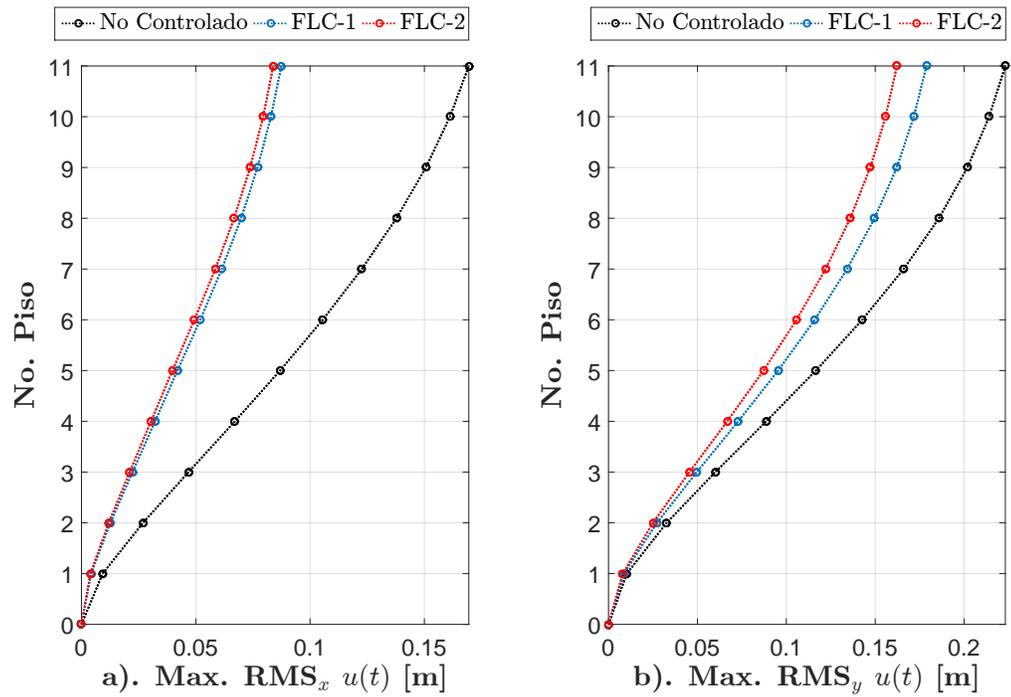


Figura 7.75.: RMS de desplazamientos-Kobe: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

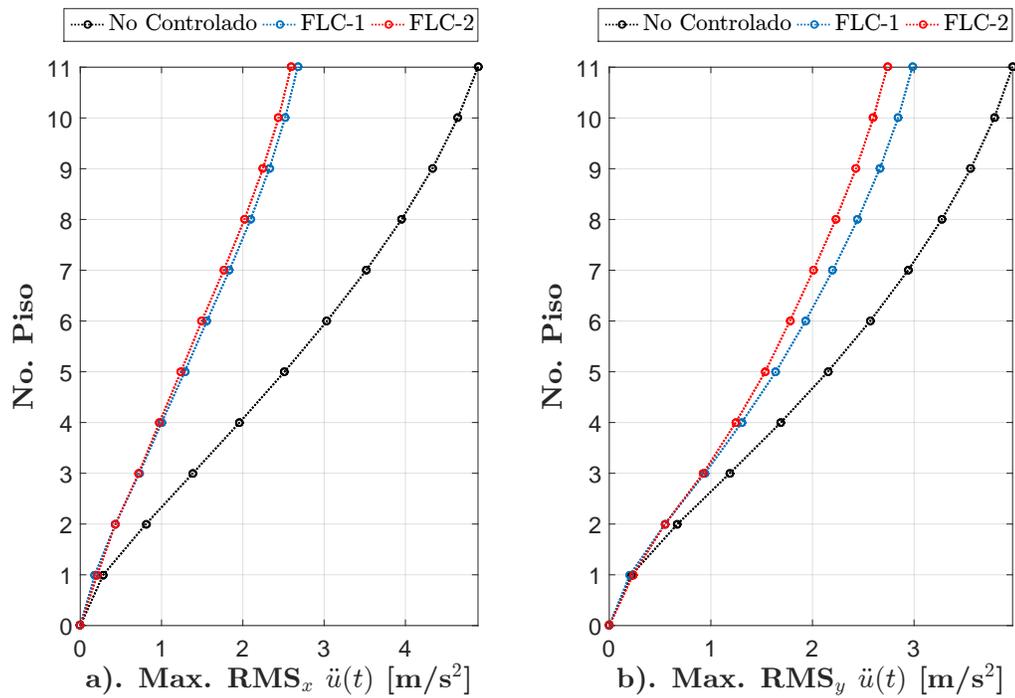


Figura 7.76.: RMS de aceleraciones-Kobe: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

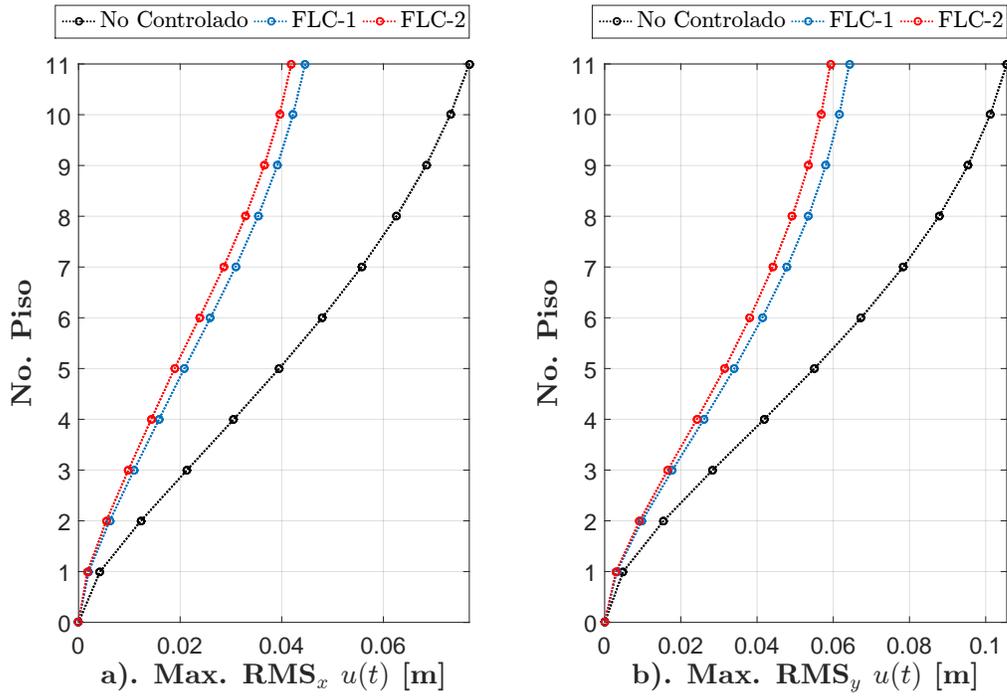


Figura 7.77.: RMS de desplazamientos-Nueva Zelanda: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

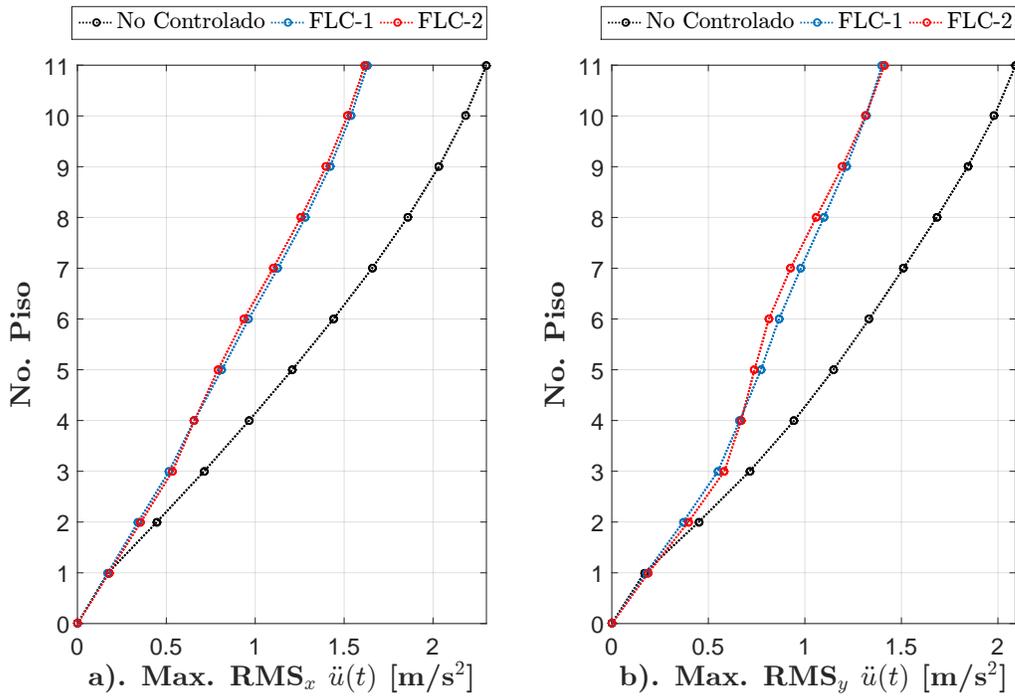


Figura 7.78.: RMS de aceleraciones-Nueva Zelanda: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

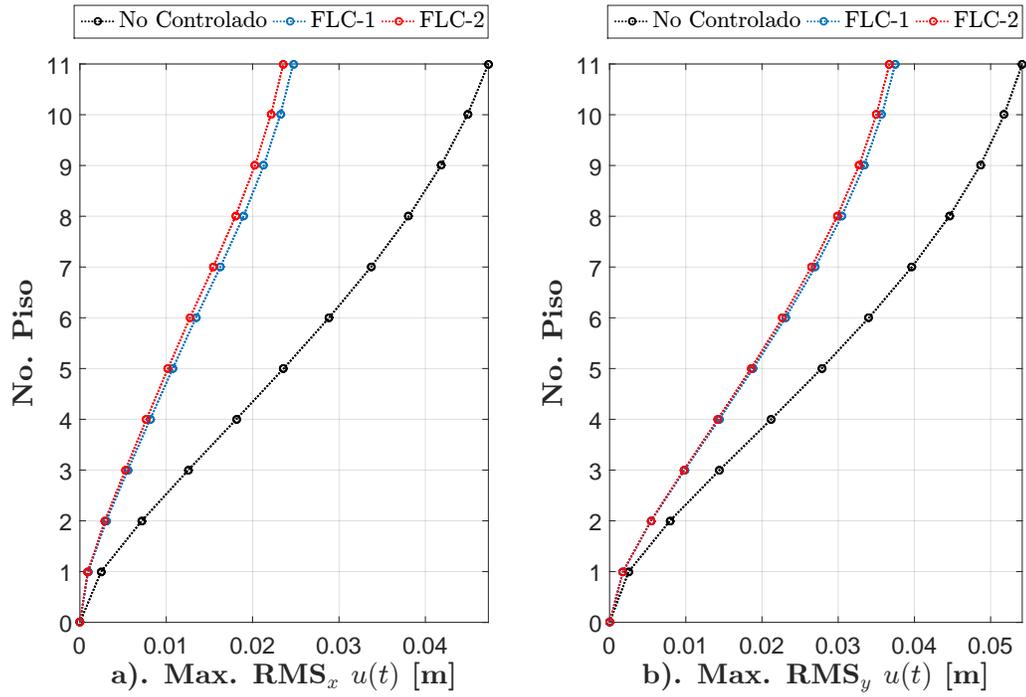


Figura 7.79.: RMS de desplazamientos-Italia: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

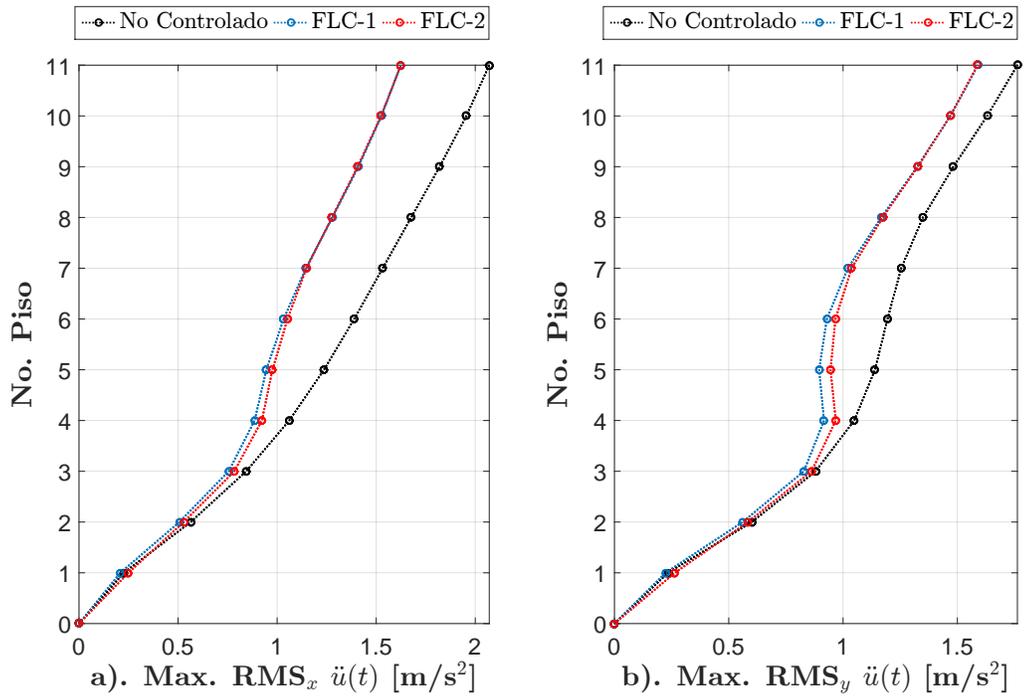


Figura 7.80.: RMS de aceleraciones-Italia: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

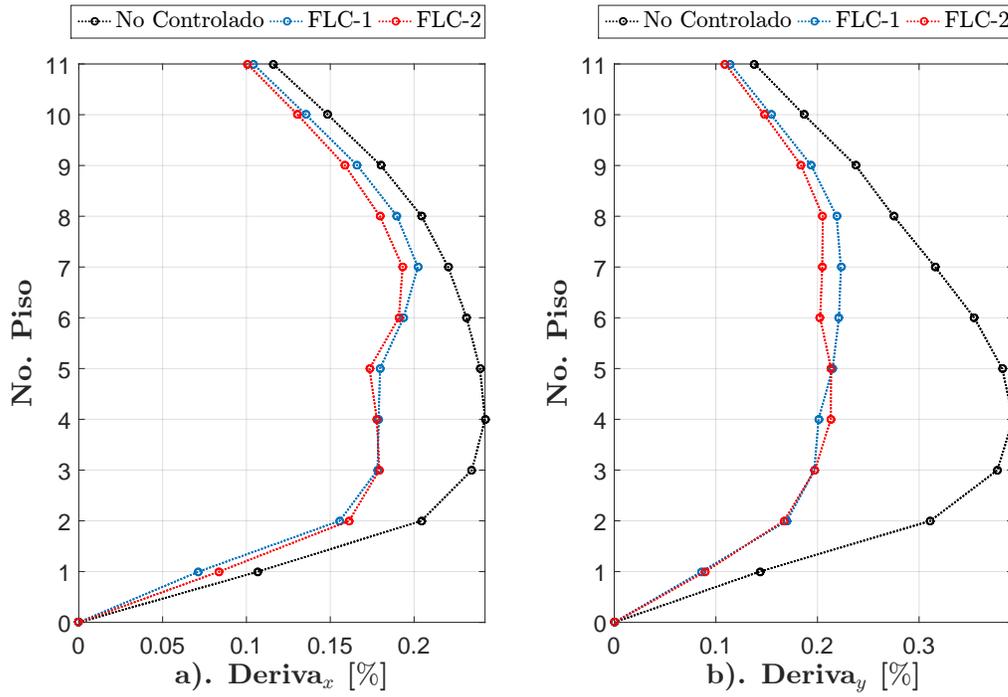


Figura 7.81.: Derivas máximas de piso-El Centro: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

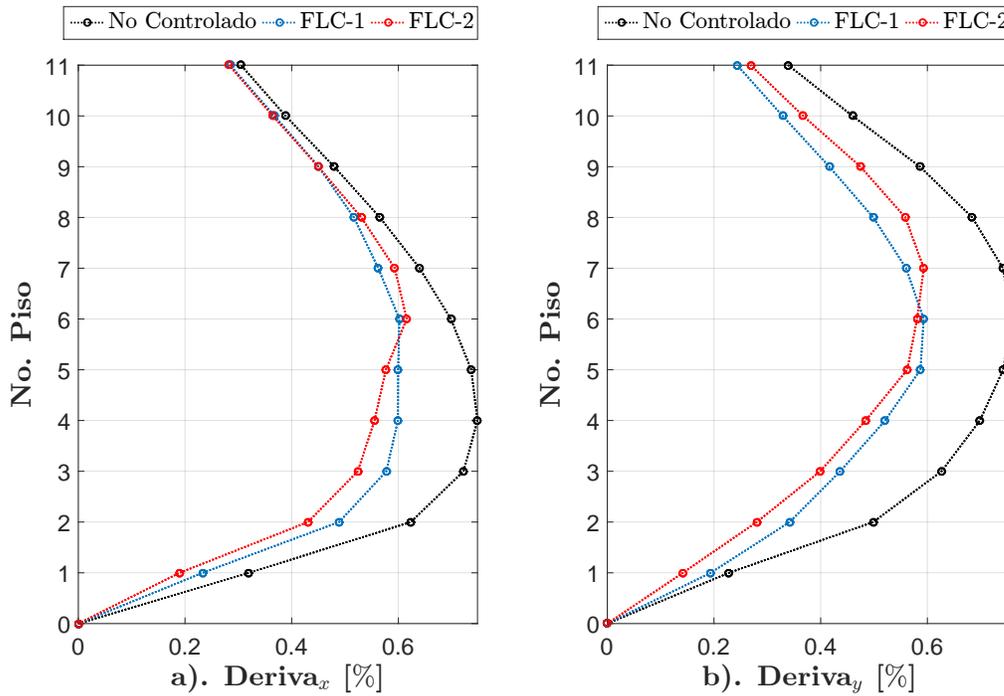


Figura 7.82.: Derivas máximas de piso-Morgan Hill: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

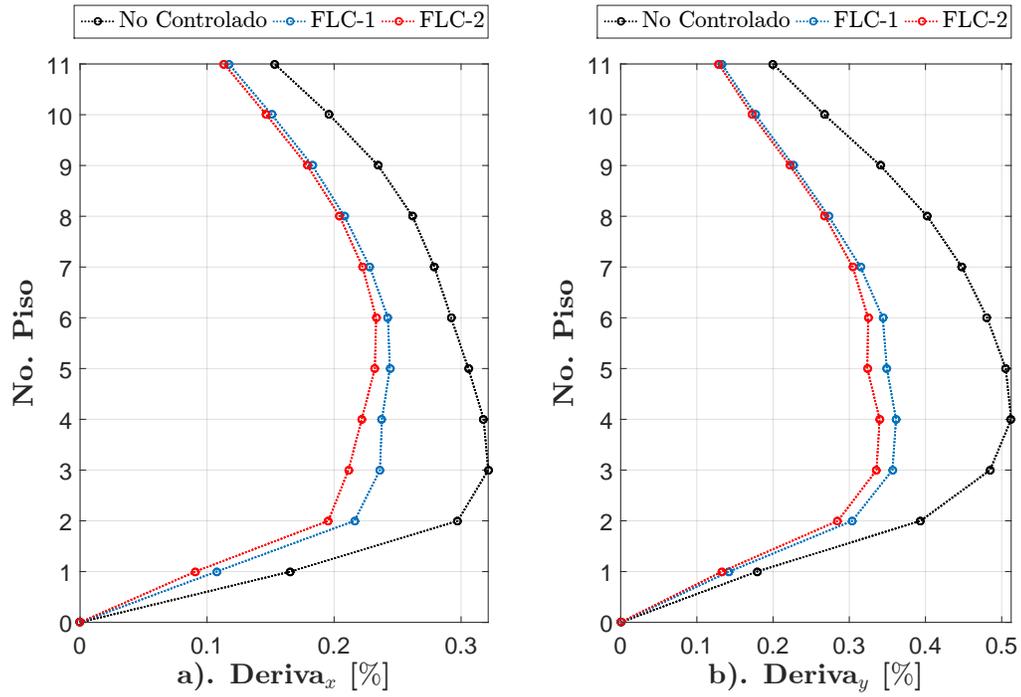


Figura 7.83.: Derivas máximas de piso-Petrolia: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

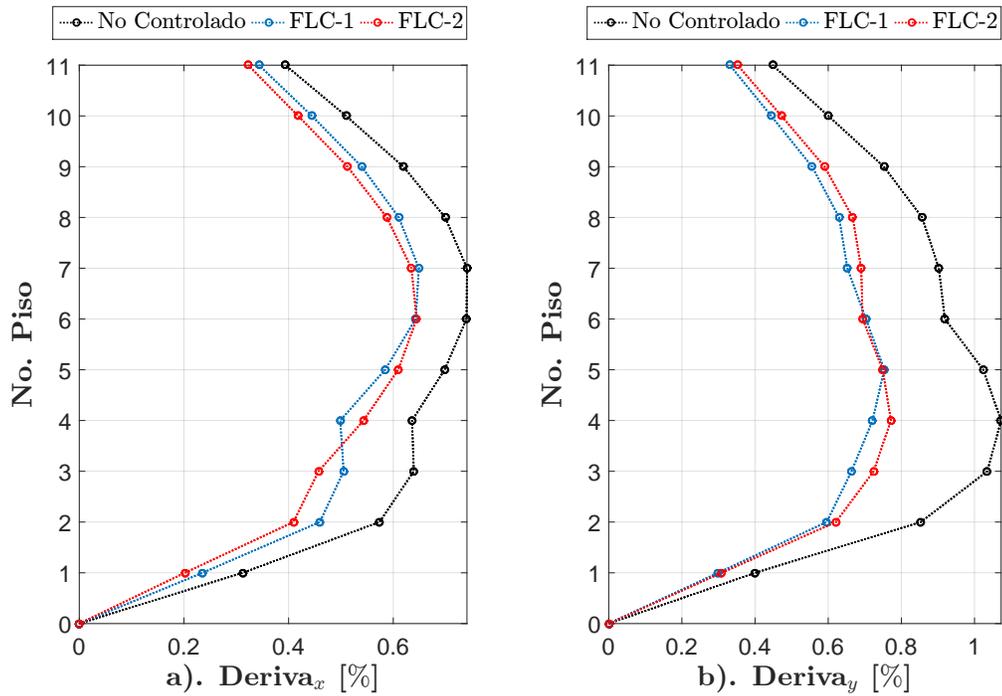


Figura 7.84.: Derivas máximas de piso-Northridge: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

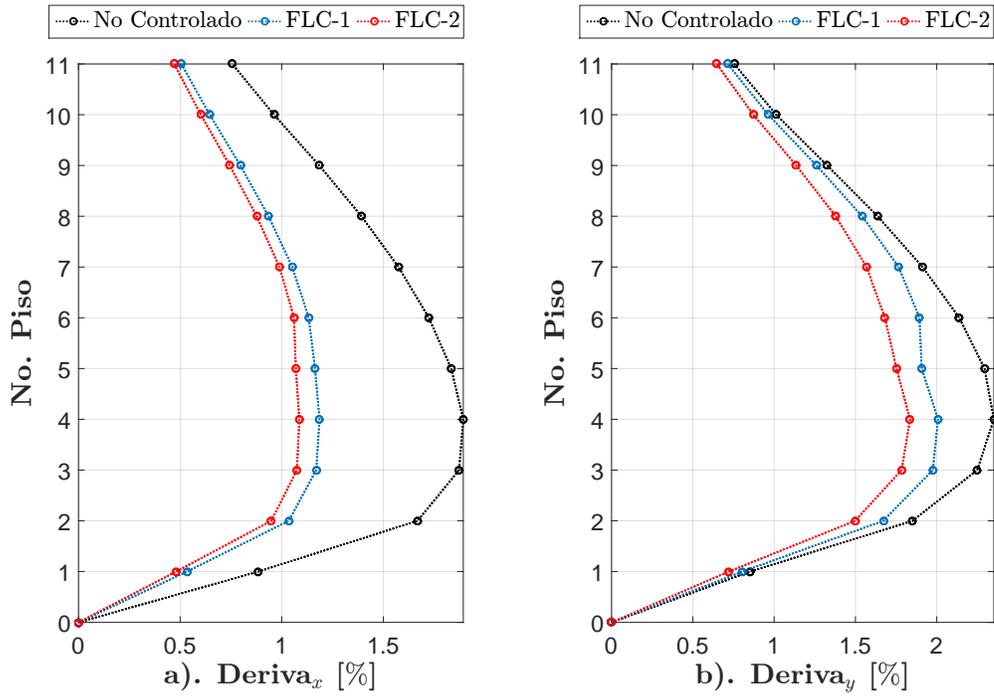


Figura 7.85.: Derivas máximas de piso-Kobe: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

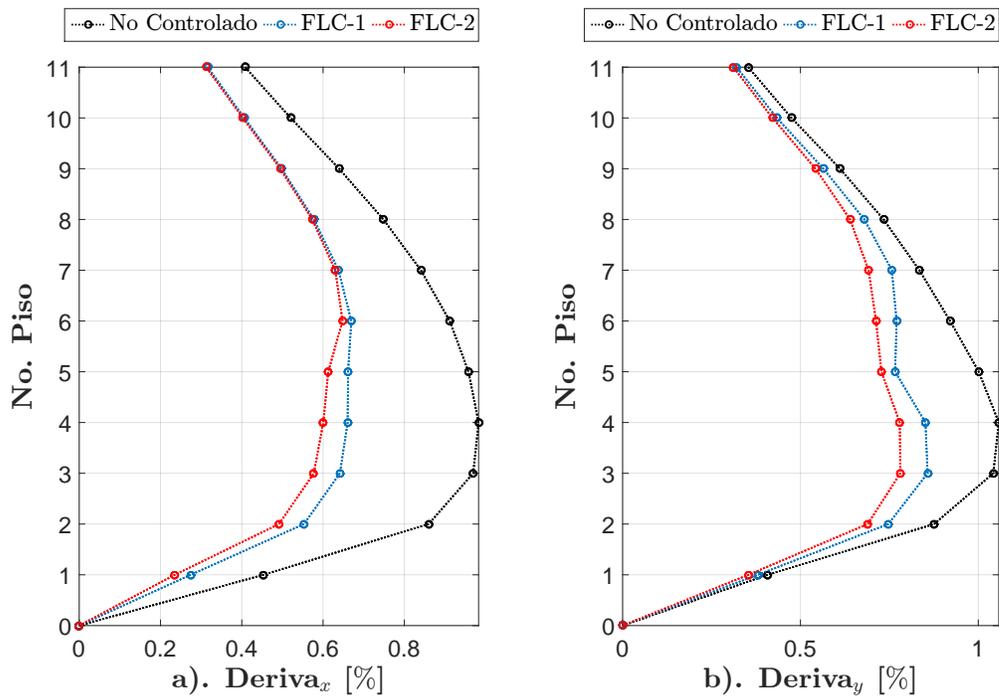


Figura 7.86.: Derivas máximas de piso-Nueva Zelanda: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

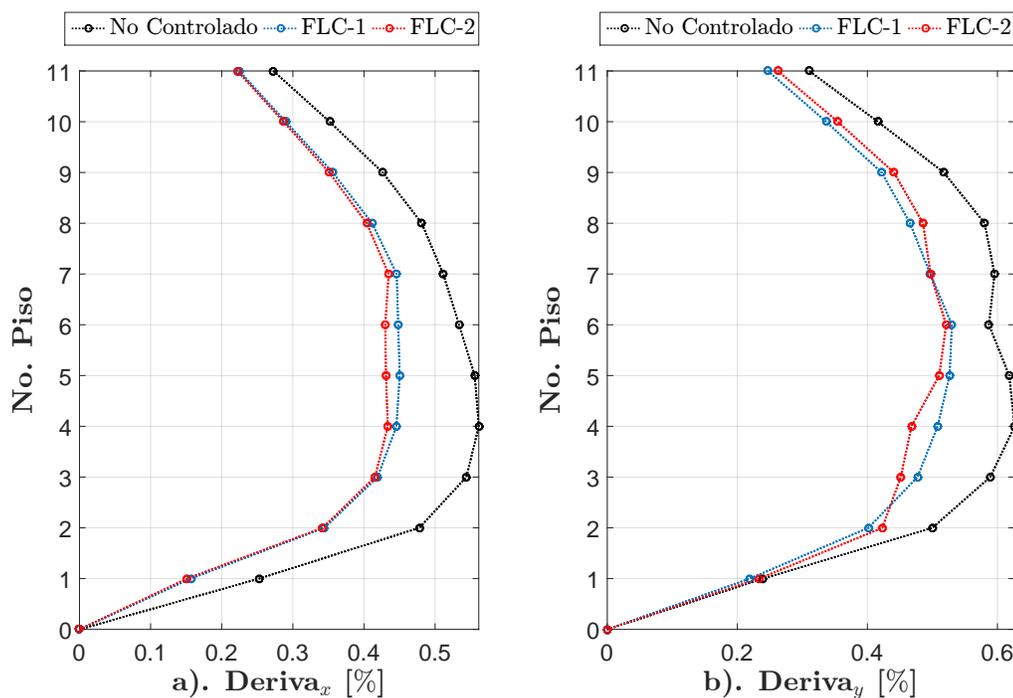


Figura 7.87.: Derivas máximas de piso-Italia: a). Dirección X b). Dirección Y
Fuente: Autor

La Tabla 7.16 presenta los valores de los radios de desplazamientos máximos obtenidos de los registros sísmicos, con sus respectivos porcentajes de reducción.

Tabla 7.16.: Desplazamiento máximos y porcentajes de reducción para el piso 11
Fuente: Autor

Sismo	Radios de desplazamiento máximo piso 11 [m]				
	No controlado	FLC-1	% Reducción	FLC-2	% Reducción
El Centro	0.112	0.073	34.25	0.073	35.79
Morgan Hill	0.273	0.228	16.48	0.228	16.29
Loma Prieta	0.527	0.393	25.43	0.393	27.13
Petrolia	0.161	0.118	26.42	0.118	30.92
Northridge	0.247	0.247	0.00	0.247	3.33
Kobe	0.720	0.594	17.49	0.594	24.43
Nueva Zelanda	0.338	0.251	25.67	0.251	23.44
Italia	0.228	0.185	18.64	0.185	21.42

Finalmente, las Figuras 7.88 a 7.94 presentan los esquemas de las trayectorias de desplazamiento del piso 11, para los registros de aceleraciones que no se analizaron en el caso particular de la sección 7.2.1.

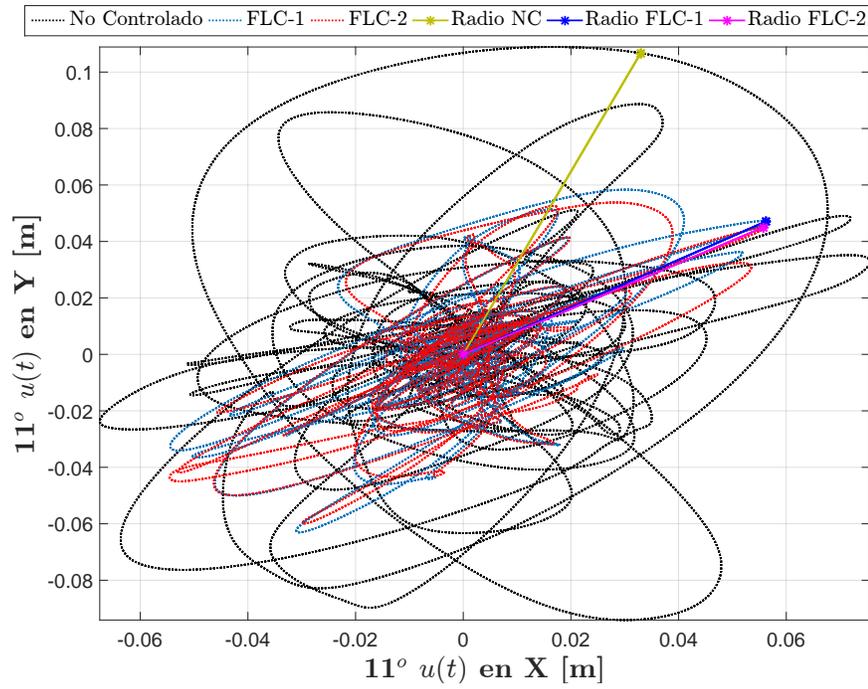


Figura 7.88.: Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-El Centro
Fuente: Autor

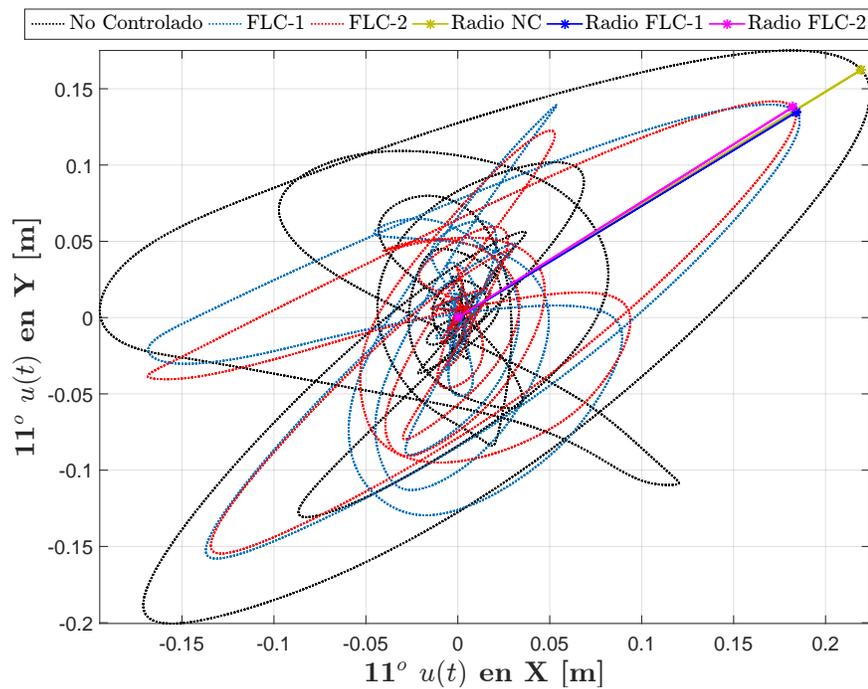


Figura 7.89.: Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Morgan Hill
Fuente: Autor

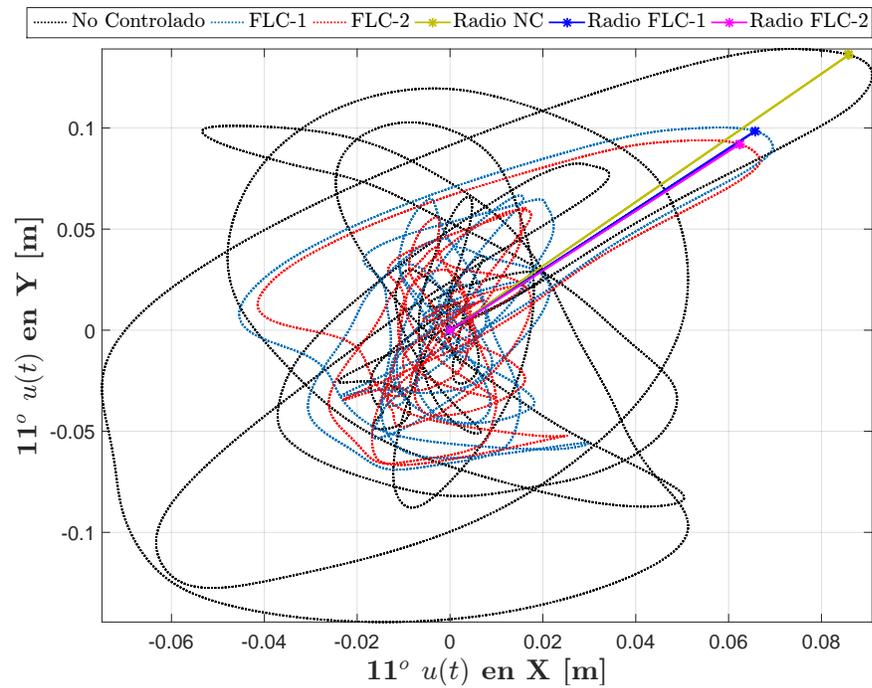


Figura 7.90.: Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Petrolia
Fuente: Autor

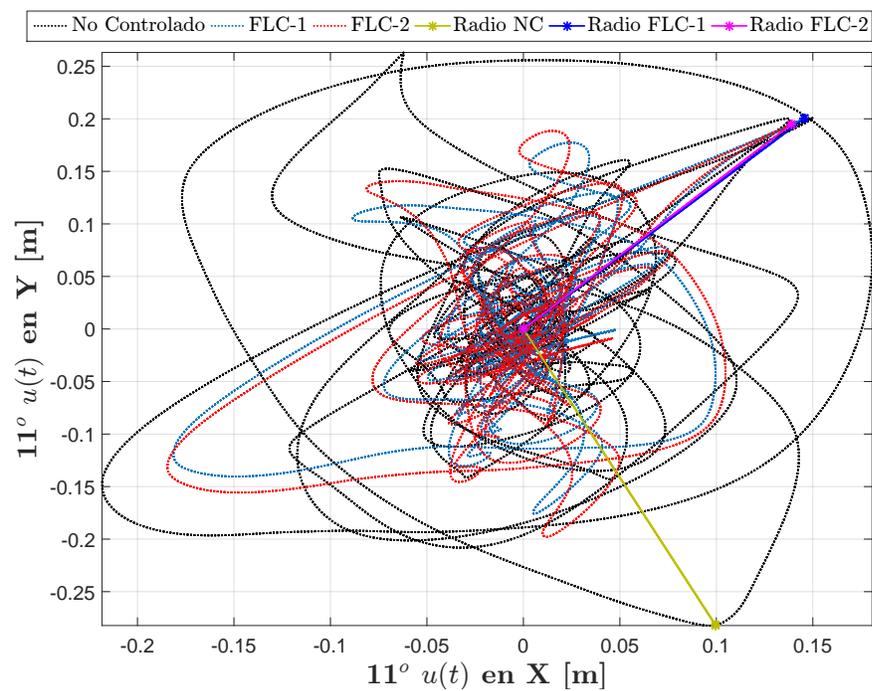


Figura 7.91.: Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Northridge
Fuente: Autor

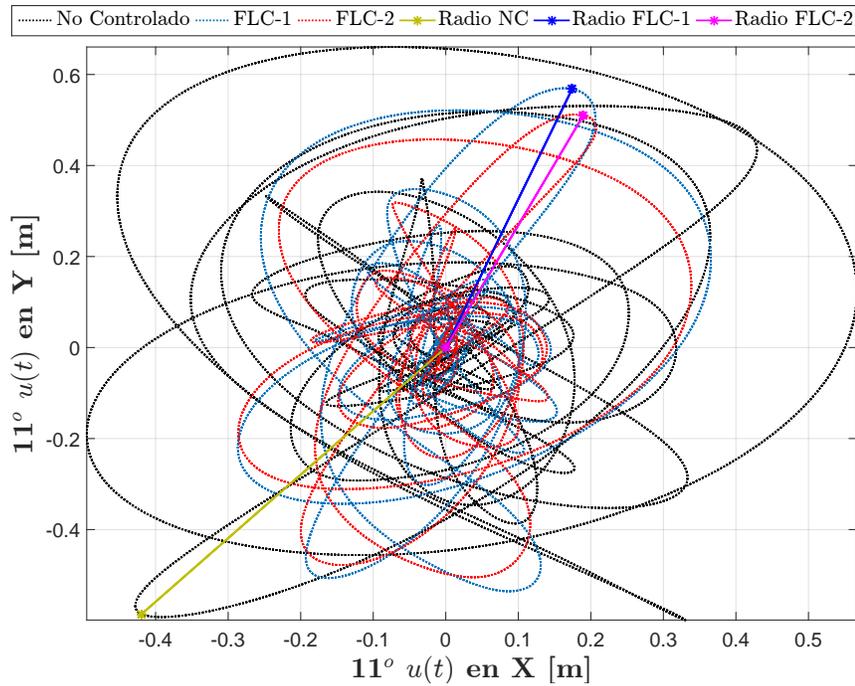


Figura 7.92.: Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Kobe

Fuente: Autor

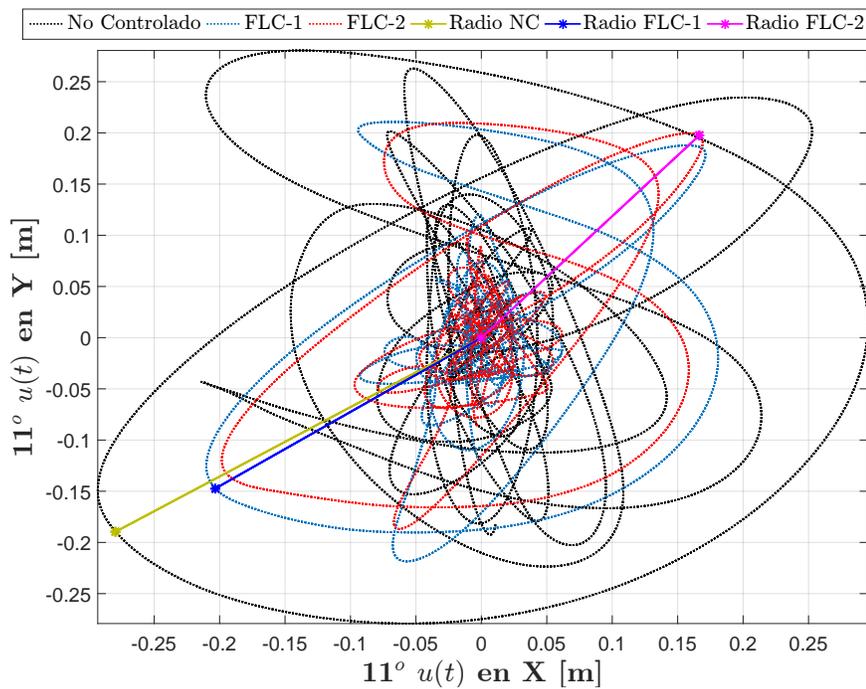


Figura 7.93.: Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Nueva Zelanda

Fuente: Autor

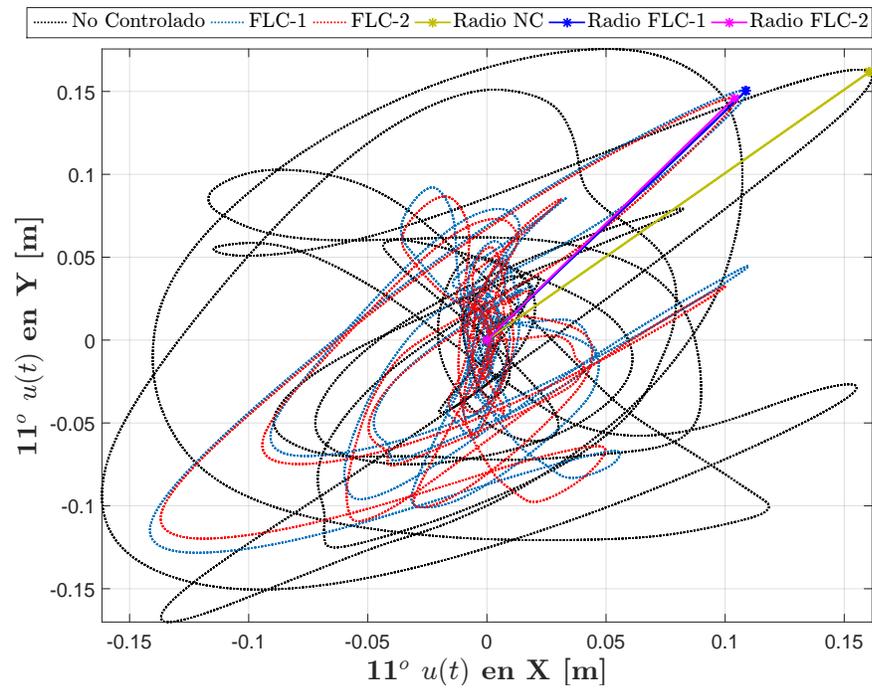


Figura 7.94.: Trayectorias de desplazamiento en el plano XY para el piso 11-Italia
Fuente: Autor

8. Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

Este estudio investiga el desempeño de un sistema de control llamado FLC-2, el cual fue programado mediante la combinación de un algoritmo genético tipo NSGA-II con lógica difusa. El controlador permite administrar fuerzas de amortiguamiento en las estructuras, a través del voltaje suministrado en el dispositivo. Se analizaron dos modelos numéricos de prueba sometidos a diferentes aceleraciones de suelo. Estos modelos consisten en un pórtico plano de 32 niveles de piso y en un pórtico tridimensional de 9 niveles de piso, el cual fue concebido bajo la hipótesis de diafragma rígido.

De forma paralela fue desarrollado un sistema de control basado en lógica difusa clásica (FLC-1), el cual ha sido estudiado en otras investigaciones [29, 75]. Este sistema ha demostrado tener un buen desempeño para reducir las respuestas dinámicas de las estructuras. El propósito con el cual se desarrolló, fue para comparar la eficiencia del FLC-2 en función de un sistema de control previamente conocido.

En los dos sistemas se emplearon como parámetros de entrada los desplazamientos y las velocidades de los primeros niveles de las edificaciones. En algunos casos que no fueron presentados en esta investigación, se emplearon como parámetros de entrada los desplazamientos y aceleraciones de los primeros niveles de las estructuras. Se pudo verificar que el cambio de estos parámetros en el FLC-1 y el FLC-2, no influye de forma significativa en los resultados finales derivados del proceso de optimización, siempre y cuando se usen los factores de escala de desplazamiento y aceleración adecuados.

Debido al comportamiento altamente no lineal del amortiguador MR y al origen estocástico de las cargas de sismo, se mantuvo como único parámetro de salida el voltaje requerido por el dispositivo para generar las fuerzas de control. Este parámetro ha sido empleado en otras investigaciones similares como las realizadas por Kim et al. [8], demostrando tener un buen desempeño para generar las fuerzas de amortiguamiento.

En el modelo del pórtico plano se emplearon 6 amortiguadores MR dispuestos en los niveles

de piso uno, seis, doce, dieciocho, veinticuatro y treinta, respectivamente. En el modelo del pórtico tridimensional se implementaron 8 amortiguadores MR distribuidos en los niveles de piso uno y ocho de la edificación. La cantidad y posición de los amortiguadores en las edificaciones que se analizaron, se determinaron a través de un procedimiento de calibración empírico. El foco principal de esta metodología se basó en obtener la menor cantidad de amortiguadores MR requeridos para garantizar un desempeño superior en la respuesta estructural de las edificaciones, en comparación con el sistema no controlado y en función de las aceleraciones de suelo analizadas.

Durante el proceso de elaboración y ejecución del FLC-1, se pudo evidenciar que este sistema puede ser construido mediante procedimientos de programación simples que requieren bajos esfuerzos computacionales. Para los sismos ensayados en esta investigación los tiempos de depuración del código variaron entre 4 y 11 minutos, empleando un ordenador que cuenta con un procesador Intel Core i7 de séptima generación y 8 GB de RAM.

Una de las limitaciones más importantes halladas en el controlador FLC-1, se asocia con la necesidad de definir un sistema de inferencia adecuado y que se ajuste a los requerimientos de optimización particulares de los sistemas estructurales a analizar. Esta característica puede generar una disminución en la eficiencia del controlador, en la medida que sea ensayado en estructuras más complejas. La razón por la cual se presenta esta condición se debe a la naturaleza empírica mediante la cual se definen el conjunto de reglas difusas, que son susceptibles a posibles errores de operación e interpretación humana.

Para el caso del controlador FLC-2 se encontró que su metodología de programación requiere un esfuerzo computacional mayor en comparación con el FLC-1. En las simulaciones realizadas para esta tesis, los tiempos de depuración del código variaron entre 18 y 37 horas. Estos ensayos se realizaron empleando el mismo ordenador con el cual fue trabajado el FLC-1.

De otro lado, la metodología de programación desarrollada con el FLC-2 permite ampliar el espacio de búsqueda de posibles soluciones potenciales para la optimización del MOP. El FLC-1 limita su operación a un único sistema de inferencia, mientras que con el FLC-2 es posible encontrar un conjunto de soluciones potenciales representados por la población del GA.

Para este caso en particular se emplearon 50 individuos y 100 generaciones, cada uno de estos elementos representa un sistema de inferencia diferente. El desempeño de cada individuo mejora a través del procedimiento de optimización característico del NSGA-II. En algunos casos que no se presentan en este trabajo se emplearon poblaciones de 20 individuos. Se encontró que para obtener resultados similares a los hallados en ensayos con poblaciones de 50 individuos, es necesario generar iteraciones de hasta 300 generaciones.

En esta metodología de programación, se destaca el cuidado que se debe tener con la definición de las funciones objetivo a optimizar en el MOP. Los GA muestran un mejor desempeño en la medida que se definen objetivos que pueden entrar en competencia o en conflicto entre sí. Por ejemplo, para el caso particular del FLC-2 se definió la respuesta pico de aceleraciones como una de las funciones objetivo. Esta función entra en conflicto con la respuesta pico de desplazamientos, ya que no necesariamente cuando ocurra el máximo desplazamiento en la estructura, va a presentarse la máxima aceleración.

Con el desarrollo de esta metodología de control se evidencia una mejora significativa en la respuesta dinámica de las edificaciones, a través de los resultados obtenidos con los índices de desempeño. En el pórtico plano se obtuvieron en promedio índices de mejora de 0.75, 0.45 y 0.52 para respuesta pico de aceleraciones, el valor RMS máximo de desplazamientos y la respuesta pico de desplazamientos. Para el caso del pórtico tridimensional los índices de desempeño obtenidos para estos parámetros fueron de 0.83, 0.62 y 0.67, respectivamente.

En ambos casos se observa que los menores índices de desempeño se obtuvieron para la respuesta pico de aceleraciones, lo cual puede explicarse a través de la fuerza de control aportada por los amortiguadores MR que de algún modo genera cierto grado de aceleración sobre las estructuras. Sin embargo, se destaca el hecho de que esta es inferior a la aceleración del sistema no controlado en todos los casos.

Teniendo en cuenta los tiempos de depuración que requieren los controladores desarrollados en esta tesis para generar fuerzas de amortiguamiento, se destaca la imposibilidad de implementar estos sistemas en tiempo real. Los registros sísmicos con los cuales se trabajaron estas simulaciones oscilan entre 15 y 30 segundos. Con el creciente avance del área de la computación es posible que a mediano plazo se pueda superar esta dificultad, por lo cual no se debe descartar las metodologías de programación que se exponen en este trabajo.

A través de la modelación numérica que se realizó para las dos edificaciones gobernadas por las estrategias de control desarrolladas en esta investigación, fue posible verificar la capacidad que tienen los amortiguadores MR para disipar de forma eficiente la energía de entrada, manteniendo a las estructuras en un rango elástico. El desempeño del FLC-2 fue superior al alcanzado por el FLC-1 en la gran mayoría de simulaciones.

En el pórtico plano el sistema de control optimizado con el NSGA-II superó con un amplio margen de diferencia la respuesta estructural del sistema no controlado. Para el grupo de aceleraciones de suelo analizadas, en promedio se presentaron mejoras del 54.5 % para la respuesta RMS de desplazamientos, 33.0 % para la respuesta RMS de aceleraciones y 37.8 % para las derivas máximas de piso. Estos resultados fueron superiores a los alcanzados por

el FLC-1, en los cuales se presentaron reducciones del 38.5% para la respuesta RMS de desplazamientos, 26.8% para la respuesta RMS de aceleraciones y 24.5% para las derivas máximas del piso.

Las formas gráficas que adquieren las derivas máximas de piso para este caso se asemejan más a la de un elemento tipo muro. Esta condición se encuentra influenciada directamente por la variación de la rigidez de estos elementos en altura y la geometría de su sección transversal.

Para el pórtico tridimensional el desempeño global del FLC-1 y FLC-2 fue semejante. Se destaca el hecho de que ambos controladores mejoraron la respuesta estructural de la edificación respecto al sistema sin control.

En la dirección del eje X, El FLC-1 mejoró en promedio la respuestas RMS de desplazamientos en un 41.3% y la respuesta RMS de aceleraciones en un 19.9%. Los porcentajes de reducción alcanzados por el FLC-2 para estas variables fueron del 43.4% y 20.1%, respectivamente. En la dirección del eje Y, el FLC-1 mejoró las respuestas RMS de desplazamientos y aceleraciones en un 30.2% y en un 15.4%, respectivamente. Los porcentajes de reducción del FLC-2 para estos parámetros fueron del 33.6% y 16.1%, respectivamente.

Respecto a los resultados obtenidos para las derivas máximas de piso, en el FCL-1 se alcanzaron porcentajes de reducción que varían entre el 16.5% y el 37.3% en el eje X y entre el 11.1% y el 43.2% en el eje Y. Para el FLC-2 los rangos de variación que se obtuvieron en las derivas de piso estuvieron entre el 13.0% y el 43.0% en el eje X y entre el 16.8% y el 45.6% en el eje Y.

8.2. Recomendaciones

A continuación se presenta un conjunto de recomendaciones generales las cuales pueden ser tenidas en cuenta para futuras investigaciones:

- Evaluar el desempeño de los sistemas de control propuestos con otro tipo de carga dinámicas, como pueden ser las cargas de viento.
- Construir un modelo prototipo de laboratorio a escala reducida con la cual pueda evaluarse de forma experimental el nivel de desempeño alcanzado por las estrategias de control desarrolladas en esta investigación.
- Generar una estrategia de control estructural basada en un algoritmo genético que demande un menor esfuerzo computacional y una mayor velocidad de procesamiento.

- Desarrollar una metodología de control basada en GA, a través de la cual sea posible generar curvas de voltaje diferentes para cada amortiguador empleado en las edificaciones.
- Utilizar las estrategias de control desarrolladas en otro tipo de estructuras, tales como puentes, plataformas off-shores, naves industriales, etc.

A. Resultados de optimización obtenidos por el NSGA-II en el FLC-2

Se presentan los resultados de optimización obtenidos a través del NSGA-II en el controlador FLC-2, para las aceleraciones de suelo que no fueron analizadas en los casos particulares del capítulo 7. Las funciones de membresía, los sistemas de inferencia y diagramas de superficie difusa del pórtico plano se indican desde la Figura A.1 hasta la Figura A.35, mientras que estos mismos resultados para el pórtico tridimensional se presentan desde la Figura A.36 hasta la Figura A.70, respectivamente.

A.1. Caso de estudio No. 1

A.1.1. Sismo: El Centro

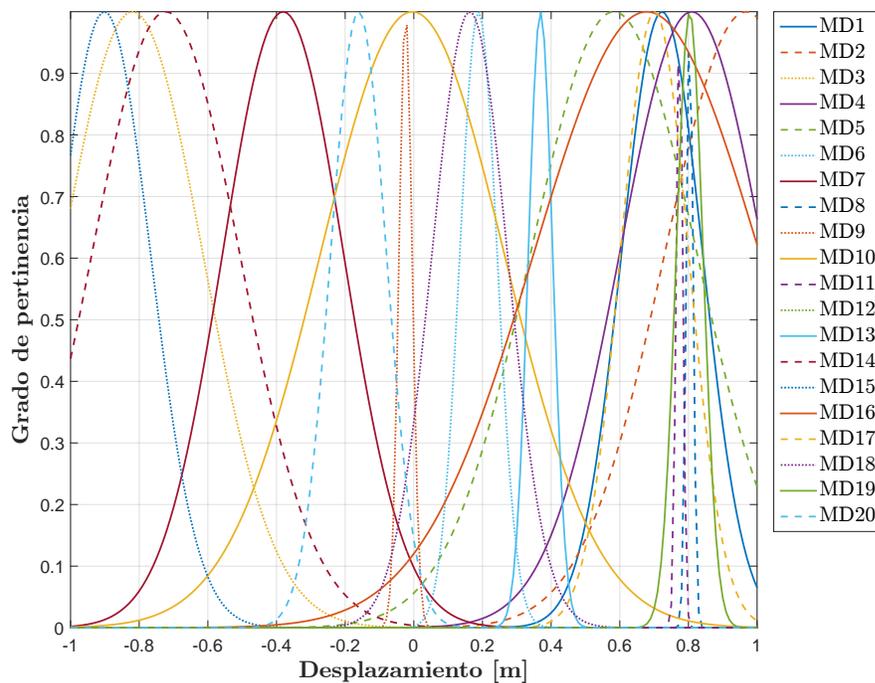


Figura A.1.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-El Centro
Fuente: Autor

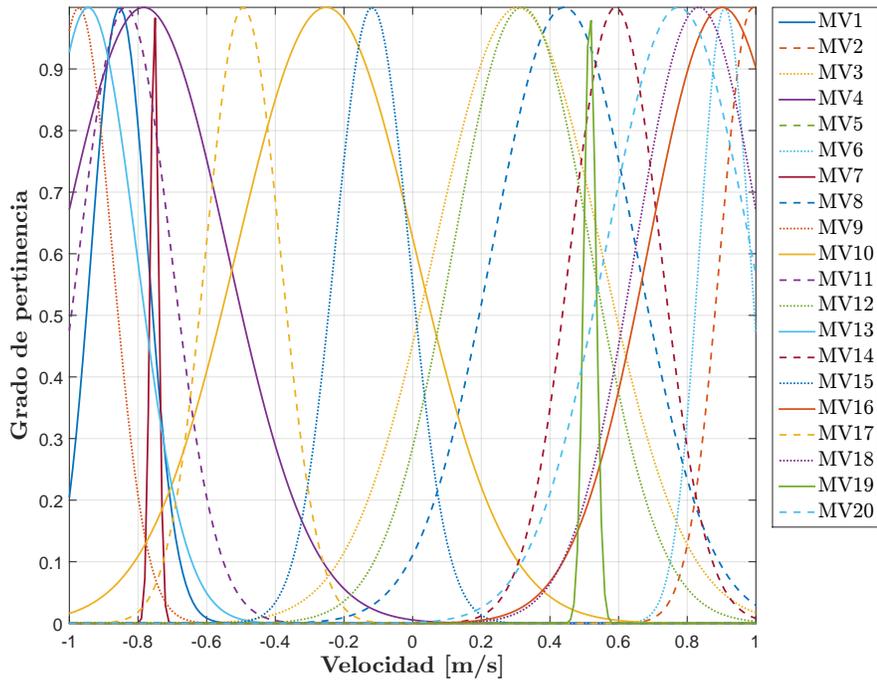


Figura A.2.: Funciones de pertinencia para la velocidad-El Centro
Fuente: Autor

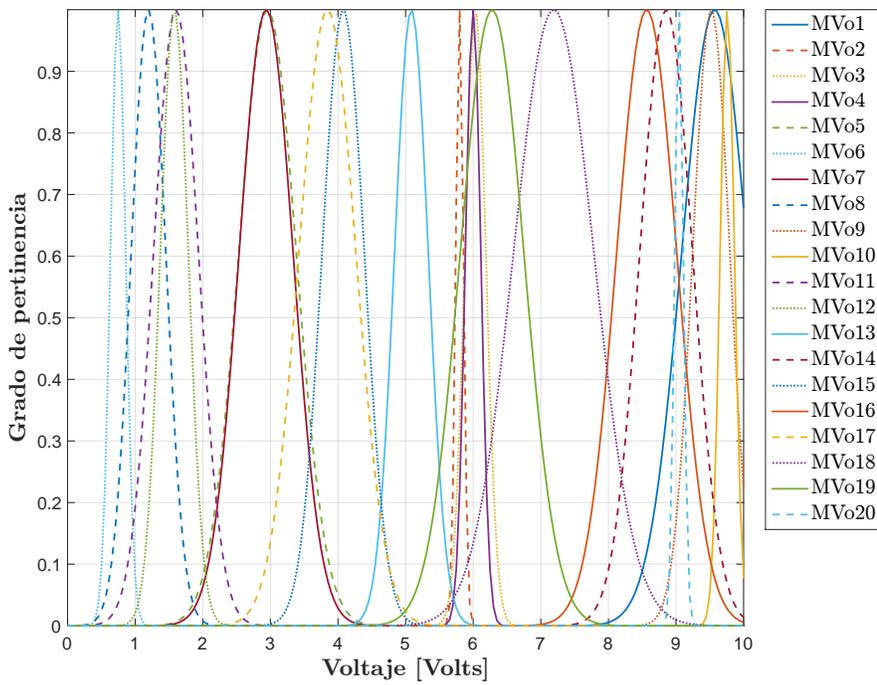


Figura A.3.: Funciones de pertinencia para el voltaje-El Centro
Fuente: Autor

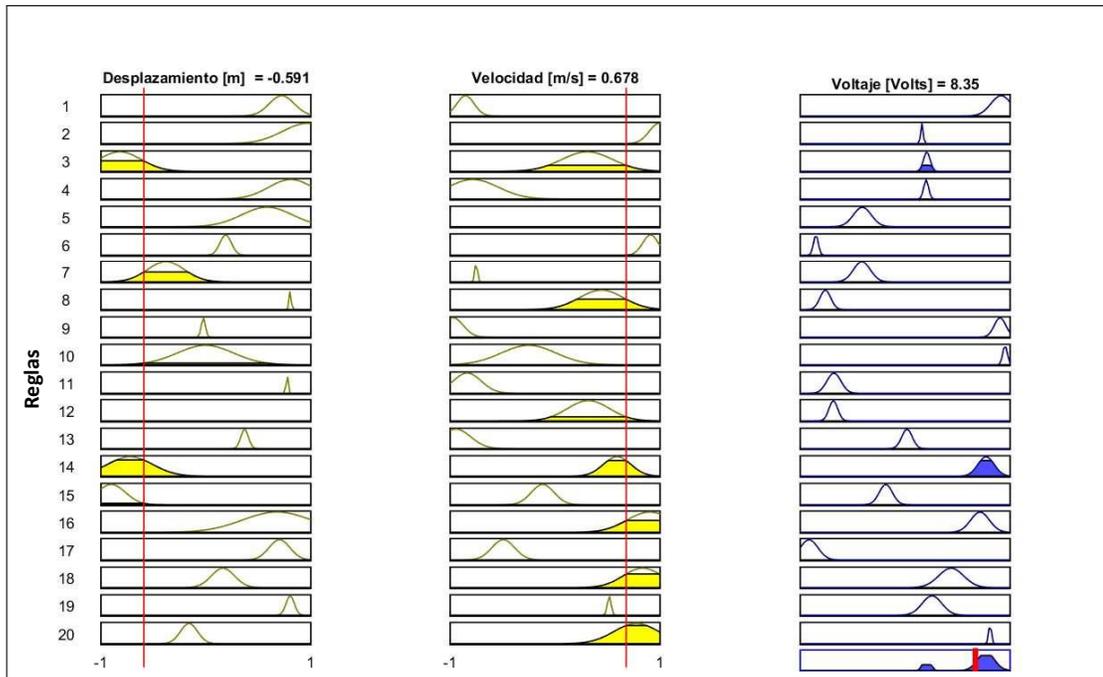


Figura A.4.: Sistema de inferencia para el controlador-El Centro
Fuente: Autor

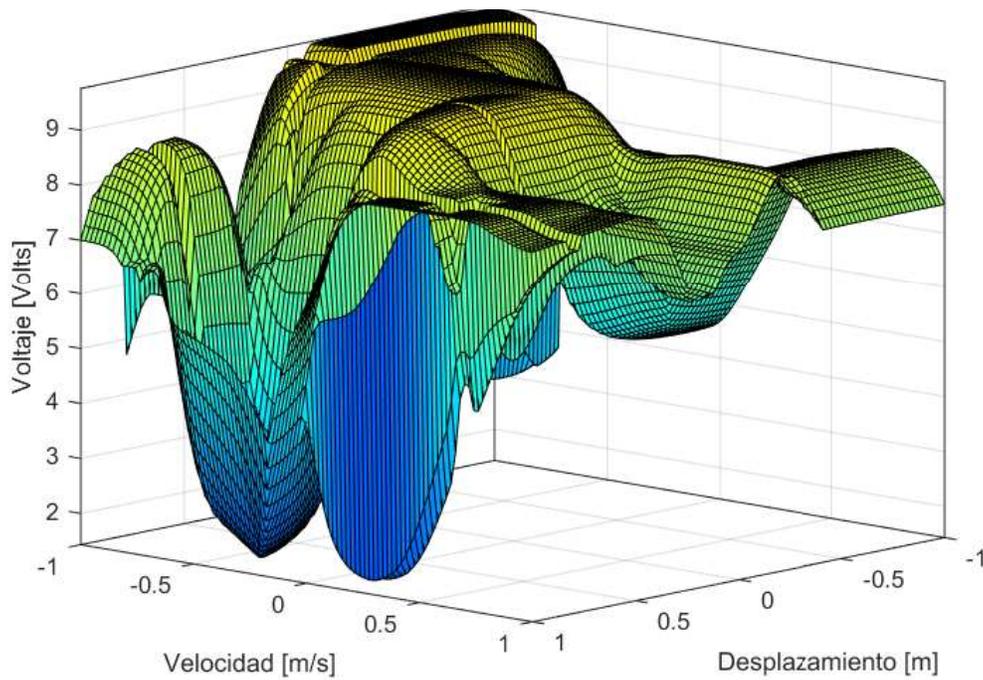


Figura A.5.: Superficie difusa para el controlador-El Centro
Fuente: Autor

A.1.2. Sismo: Morgan Hill

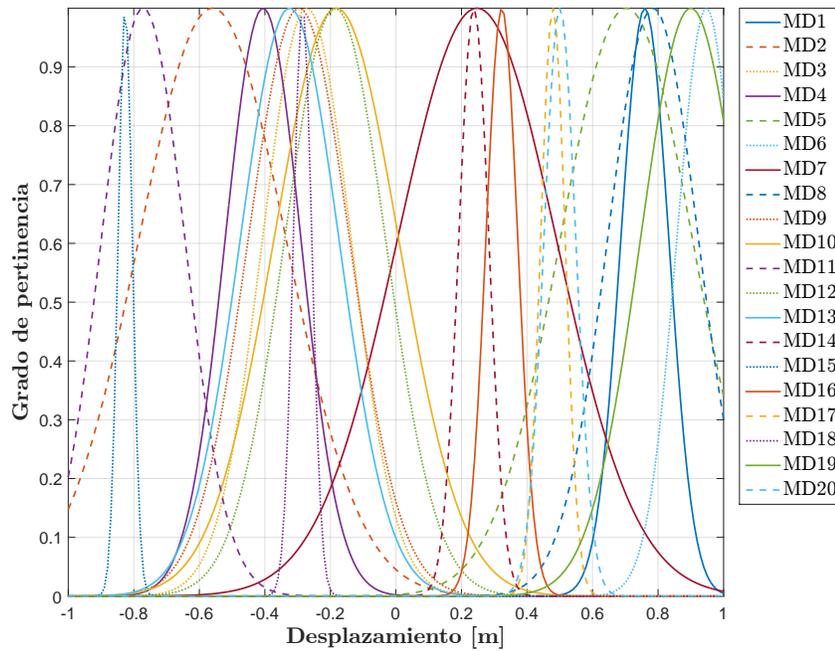


Figura A.6.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-M. Hill
Fuente: Autor

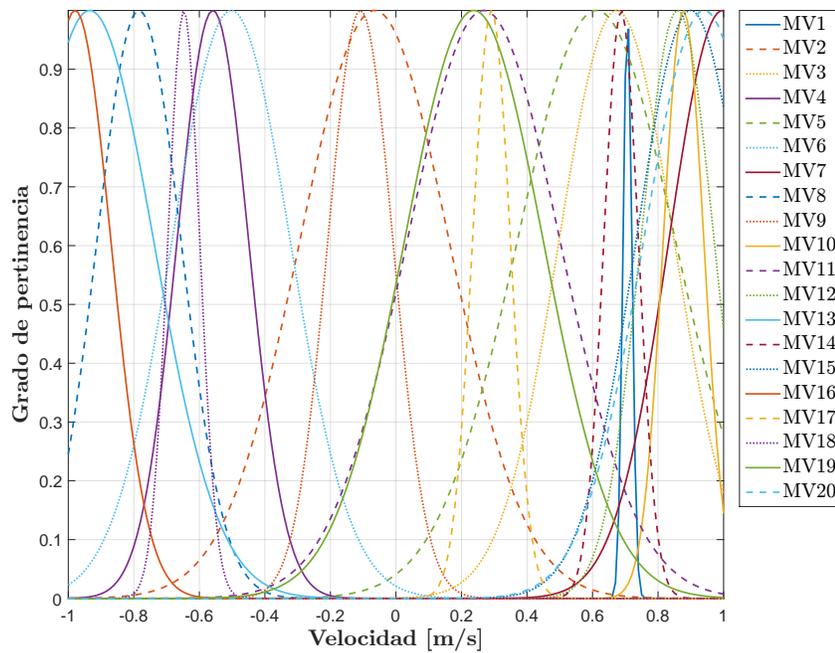


Figura A.7.: Funciones de pertinencia para la velocidad-M. Hill
Fuente: Autor

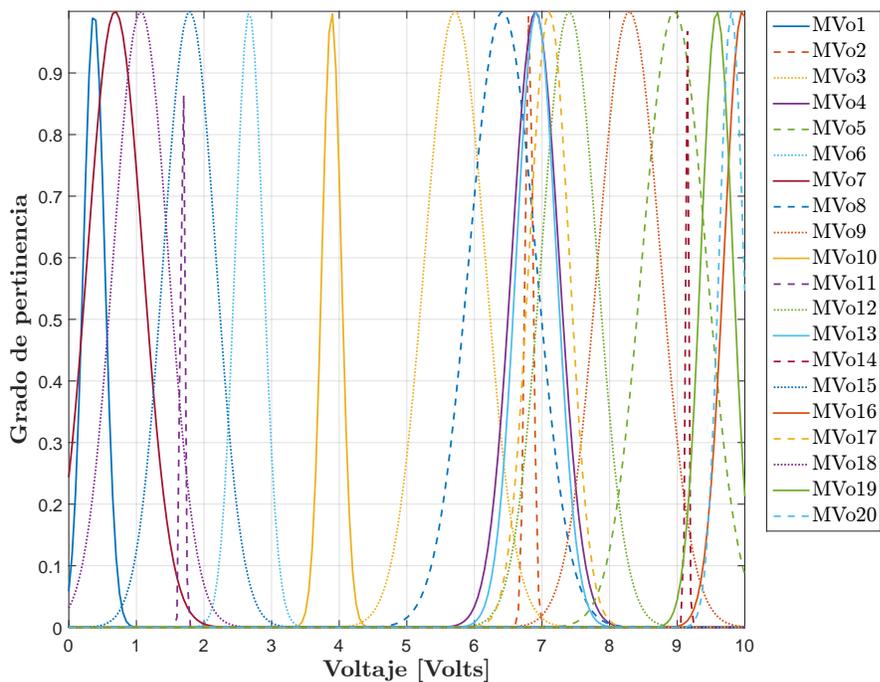


Figura A.8.: Funciones de pertinencia para el voltaje-M. Hill
Fuente: Autor

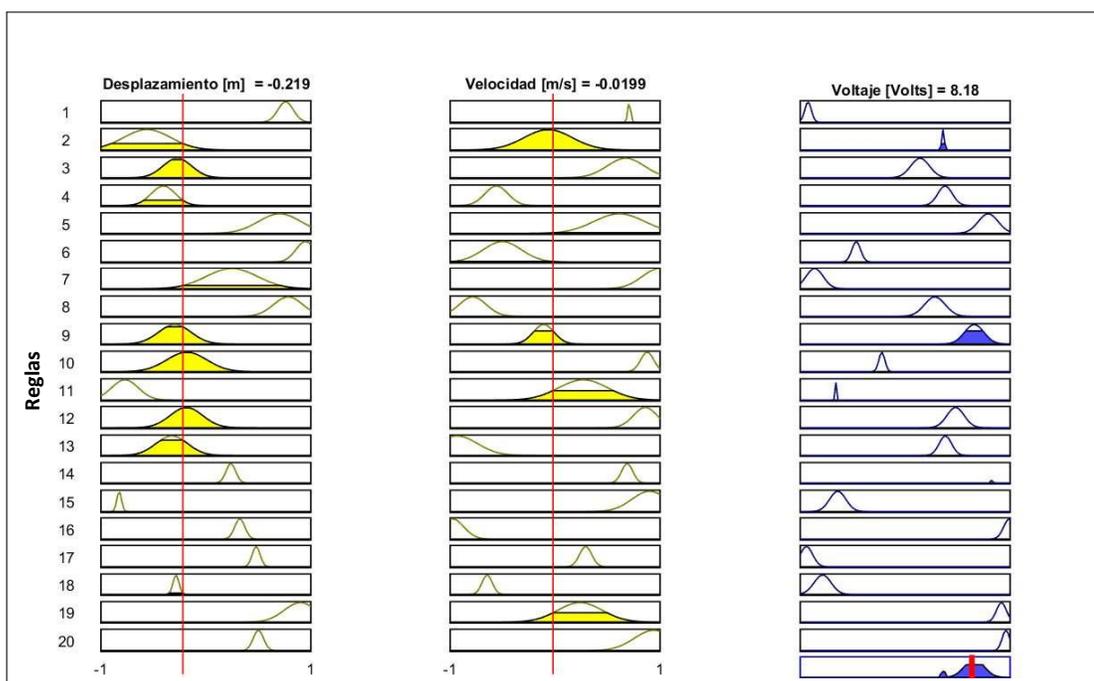


Figura A.9.: Sistema de inferencia para el controlador-M. Hill
Fuente: Autor

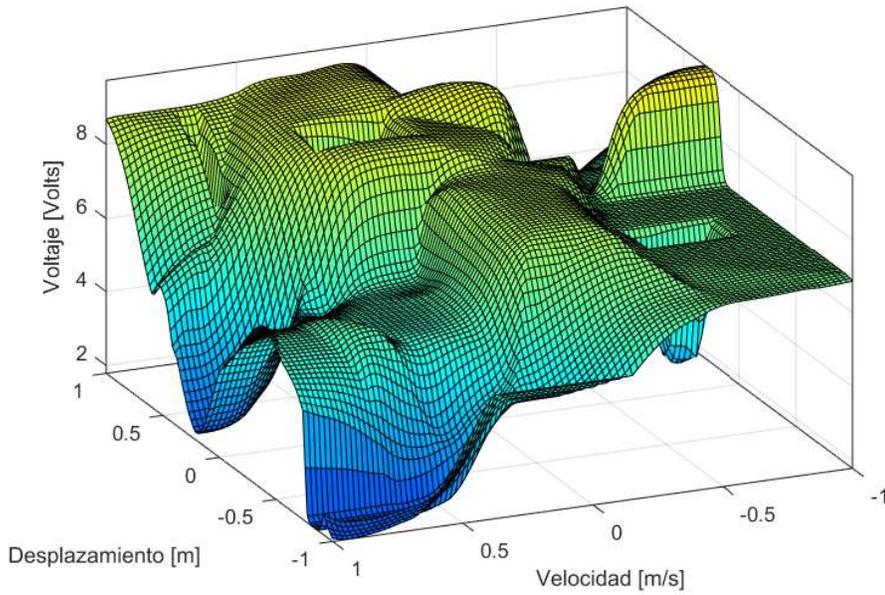


Figura A.10.: Superficie difusa para el controlador-M. Hill
Fuente: Autor

A.1.3. Sismo: Loma Prieta

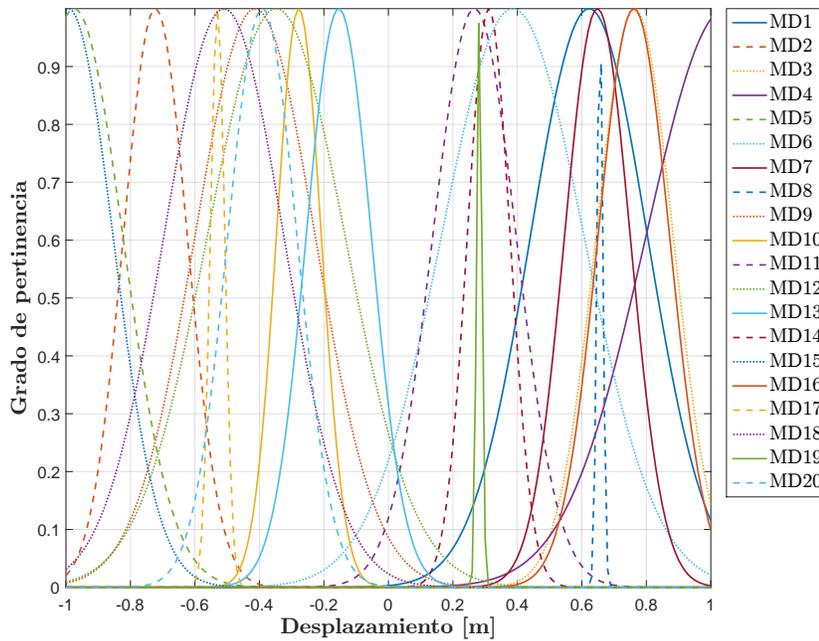


Figura A.11.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Loma Prieta
Fuente: Autor

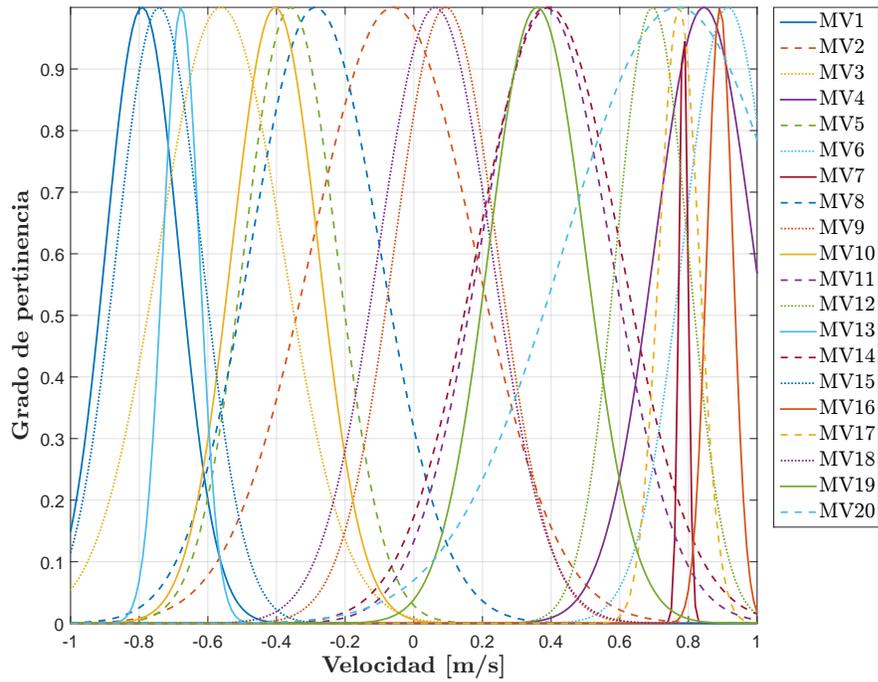


Figura A.12.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Loma Prieta
Fuente: Autor

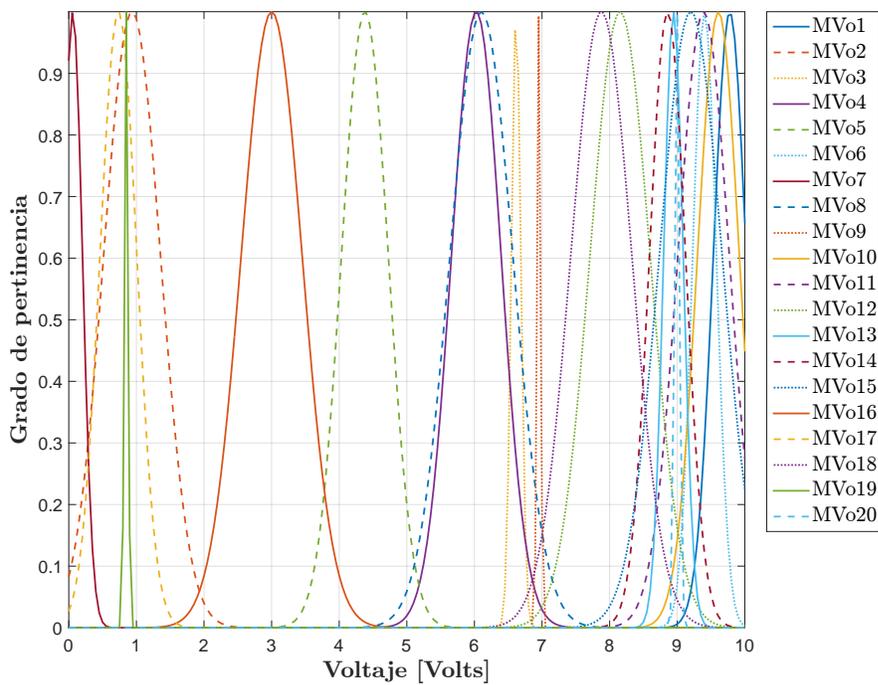


Figura A.13.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Loma Prieta
Fuente: Autor

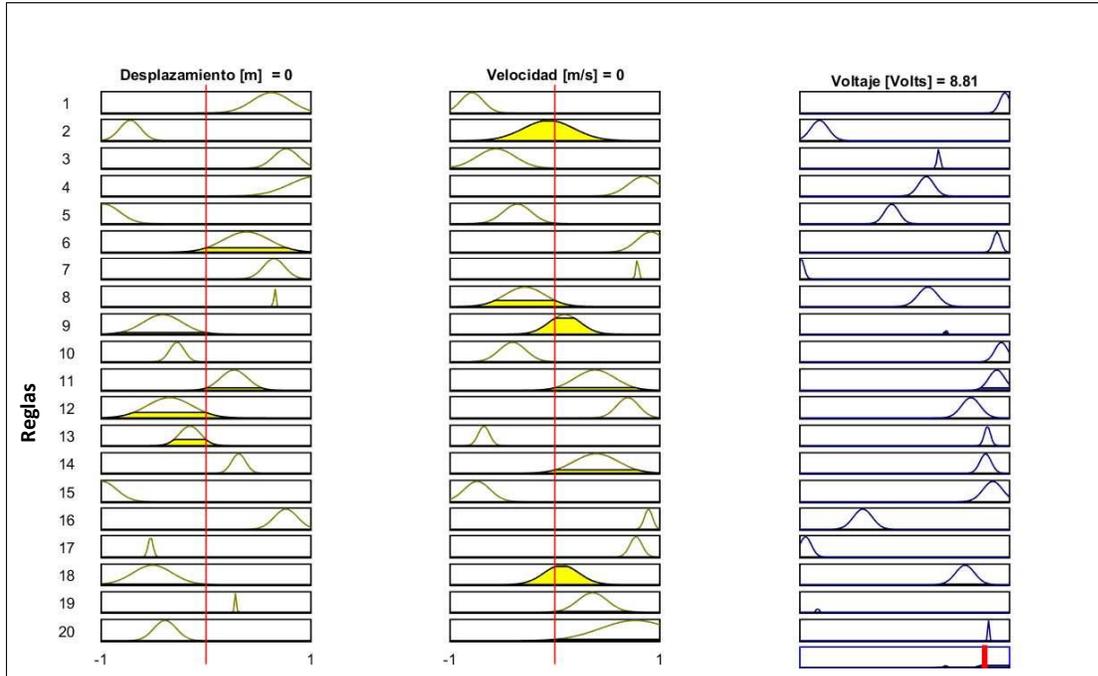


Figura A.14.: Sistema de inferencia para el controlador-Loma Prieta
Fuente: Autor

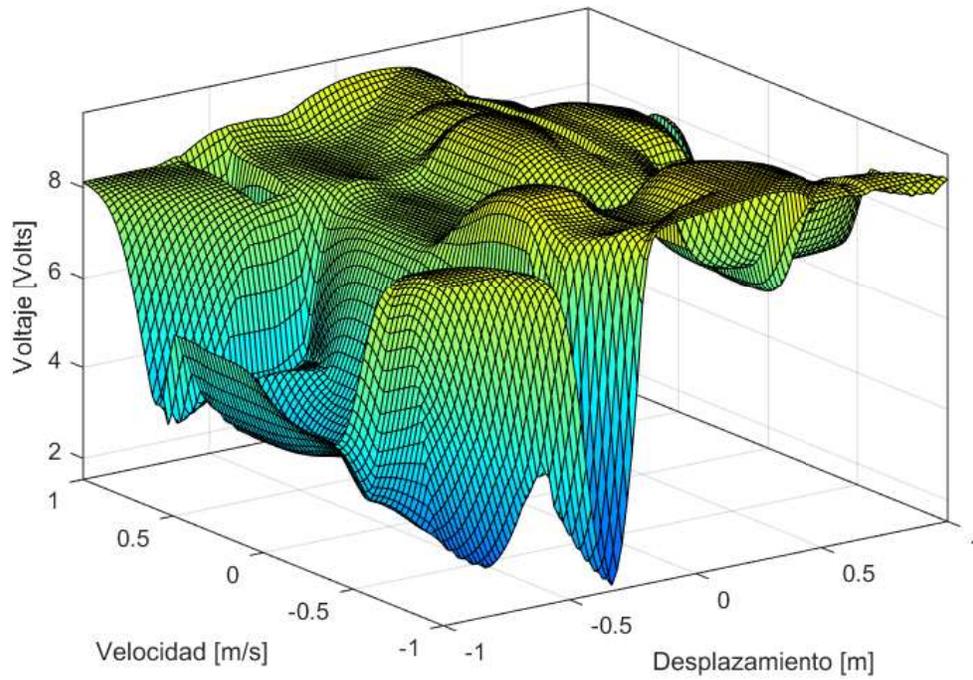


Figura A.15.: Superficie difusa para el controlador-Loma Prieta
Fuente: Autor

A.1.4. Sismo: Petrolia

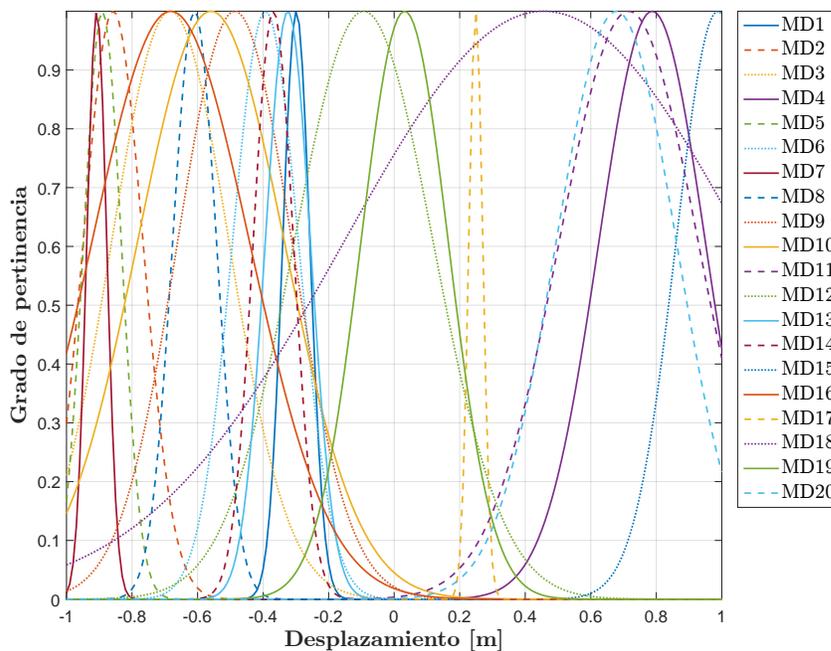


Figura A.16.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Petrolia
Fuente: Autor

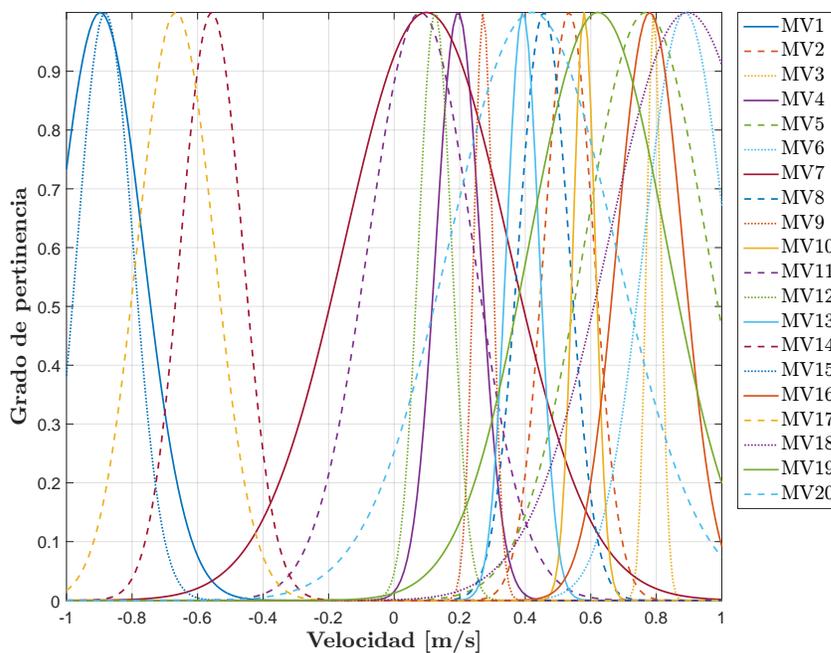


Figura A.17.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Petrolia
Fuente: Autor

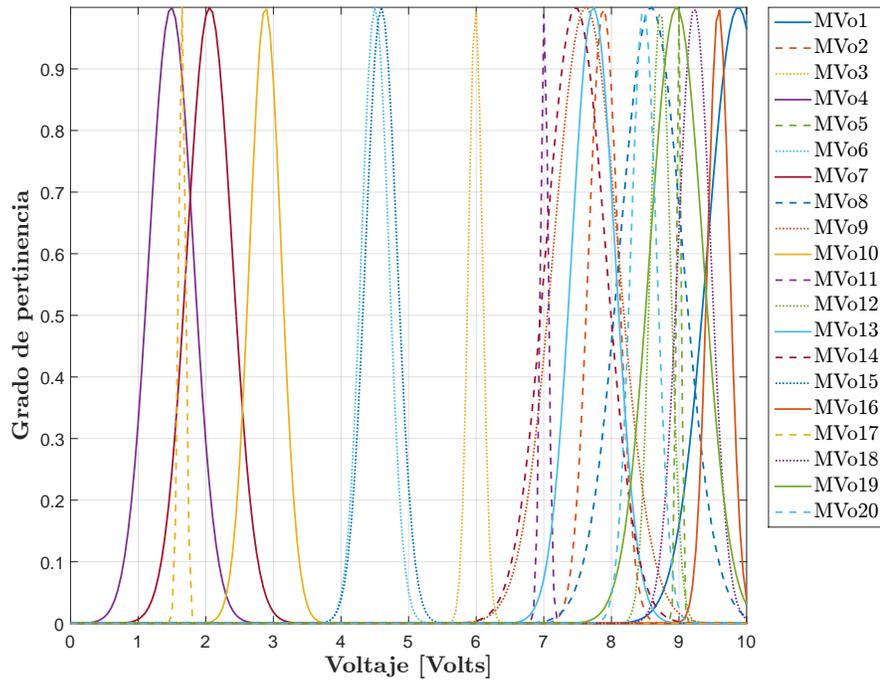


Figura A.18.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Petrolia
Fuente: Autor

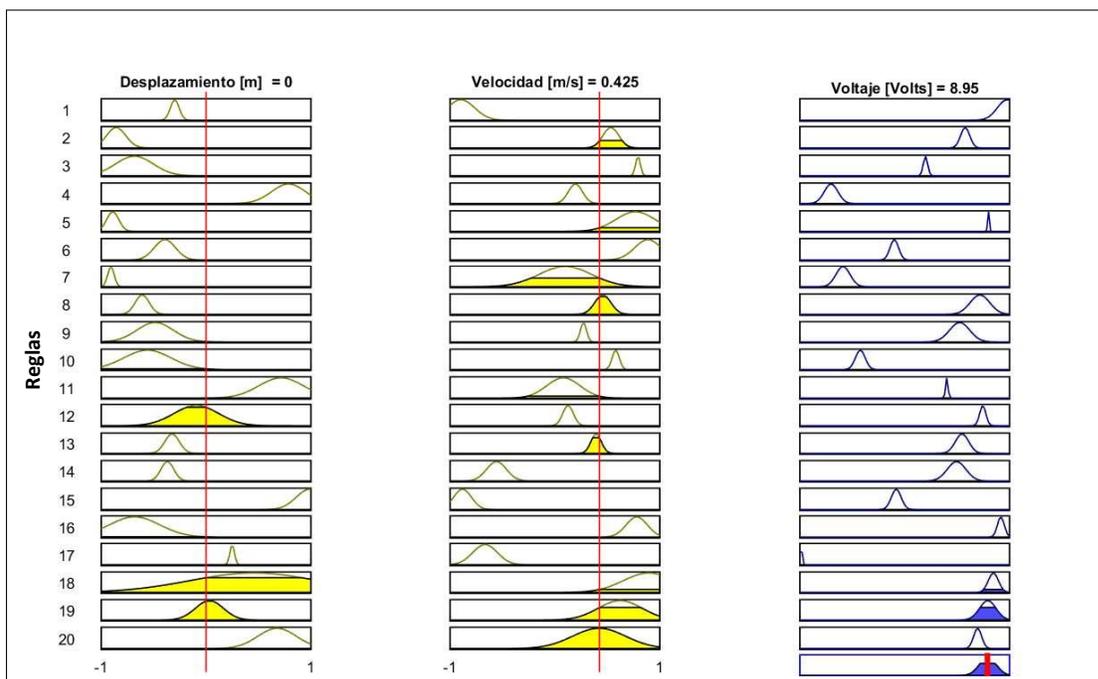


Figura A.19.: Sistema de inferencia para el controlador-Petrolia
Fuente: Autor

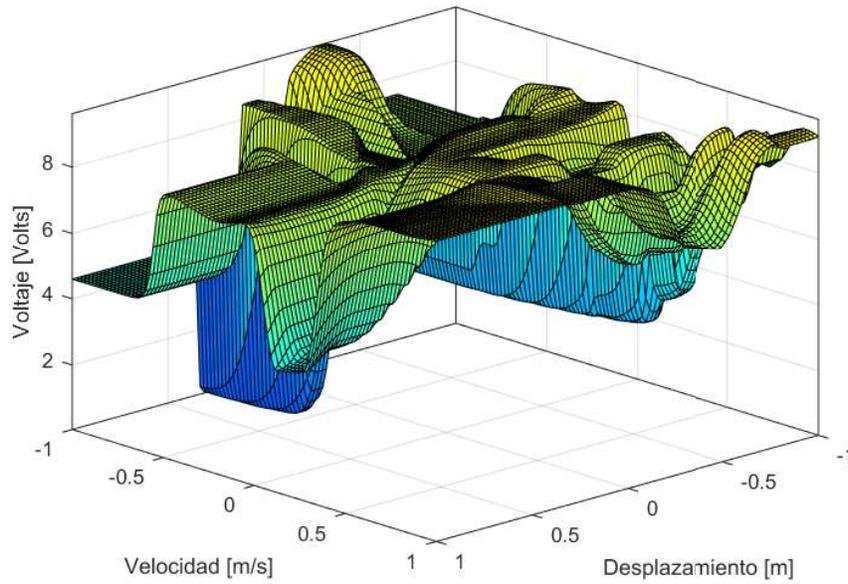


Figura A.20.: Superficie difusa para el controlador-Petrolia
Fuente: Autor

A.1.5. Sismo: Northridge

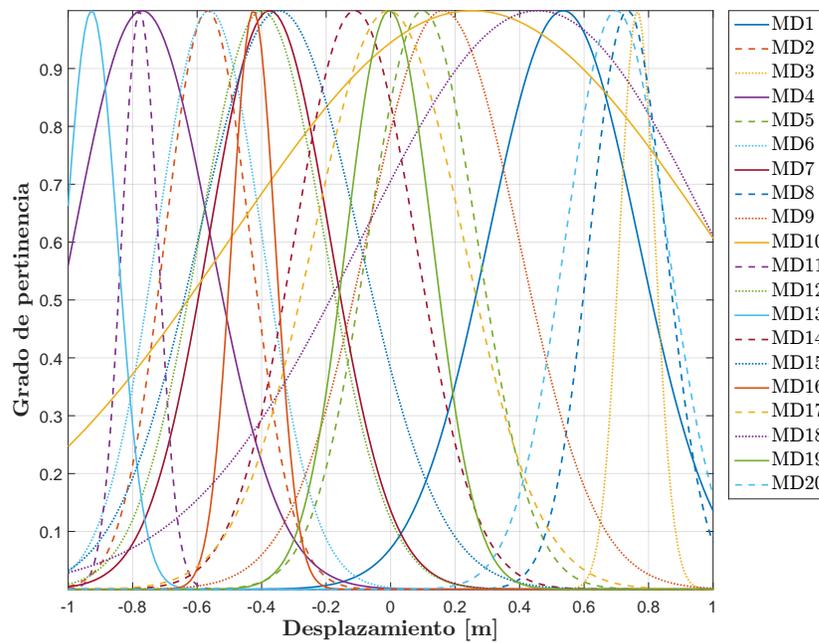


Figura A.21.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Northridge
Fuente: Autor

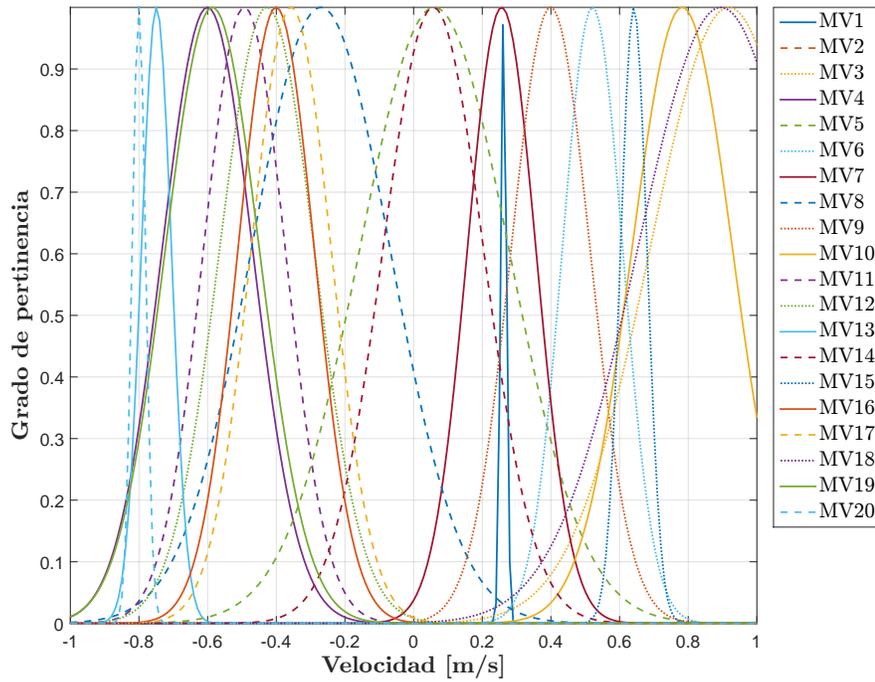


Figura A.22.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Northridge
Fuente: Autor

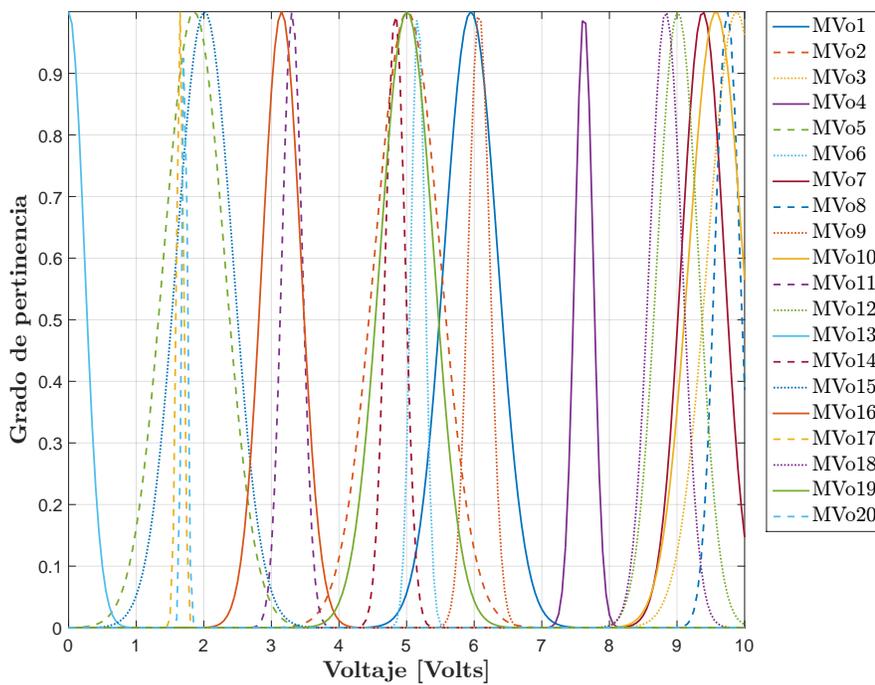


Figura A.23.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Northridge
Fuente: Autor

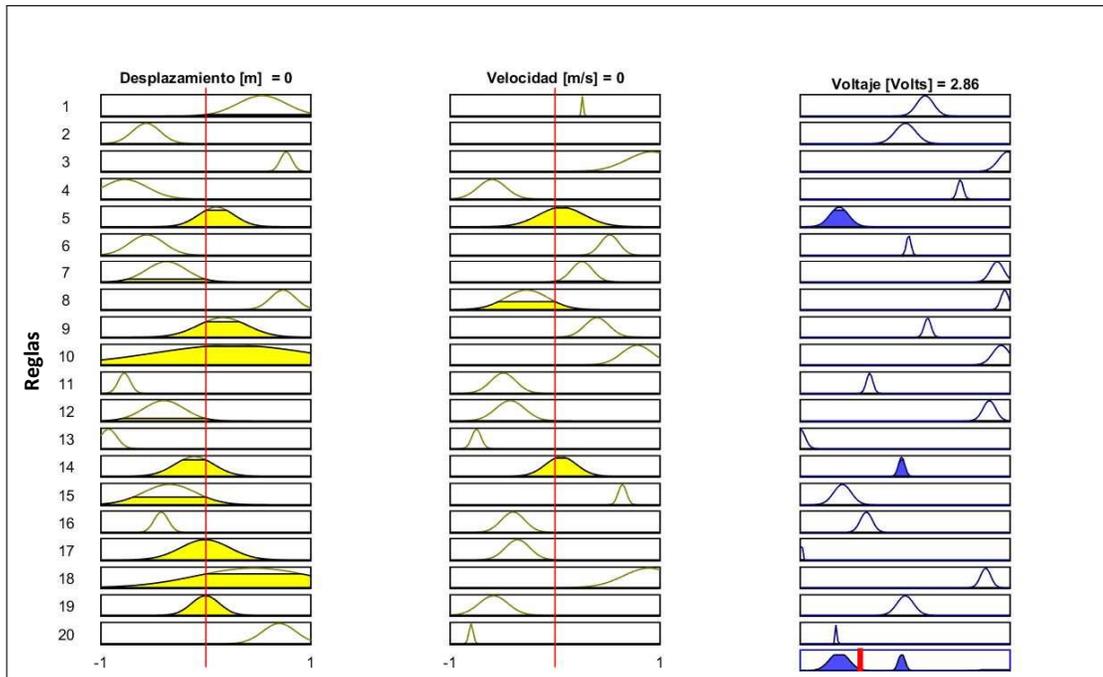


Figura A.24.: Sistema de inferencia para el controlador-Northridge
Fuente: Autor

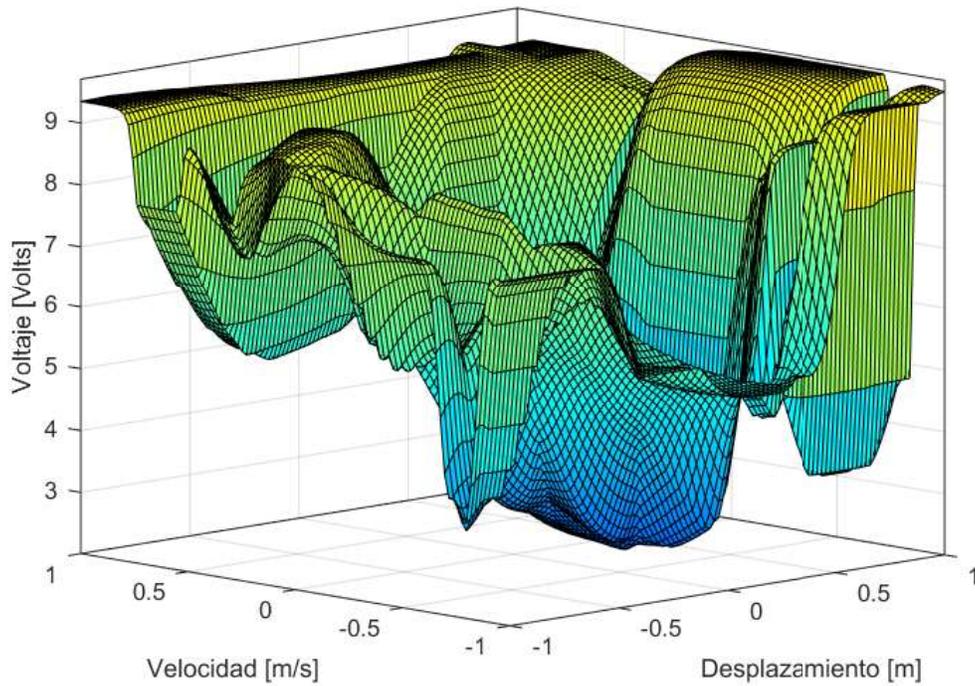


Figura A.25.: Superficie difusa para el controlador-Northridge
Fuente: Autor

A.1.6. Sismo: Nueva Zelanda

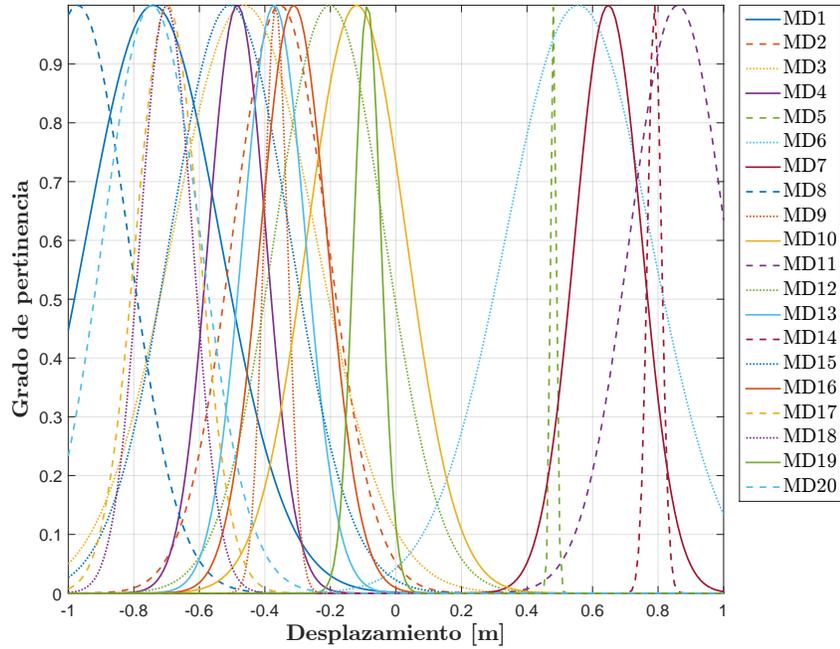


Figura A.26.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

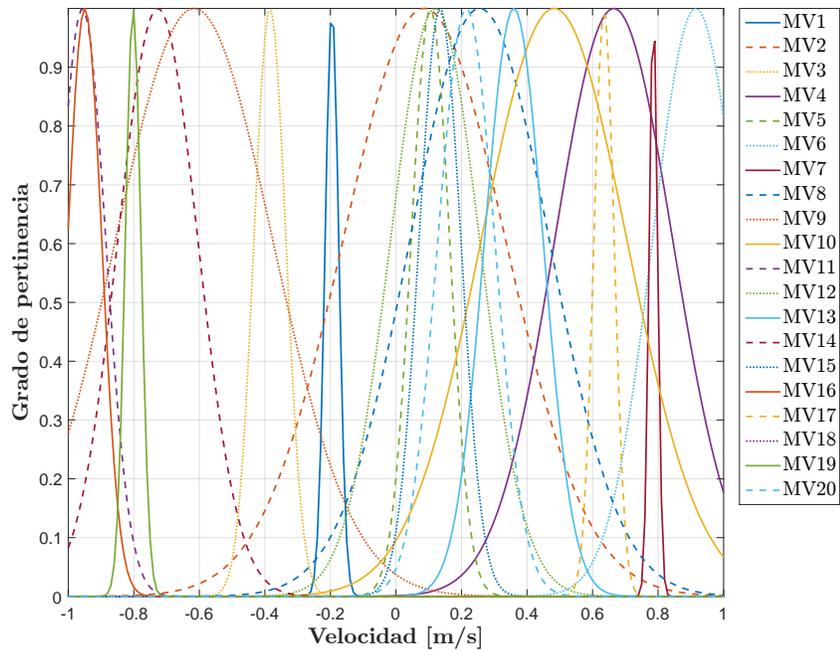


Figura A.27.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

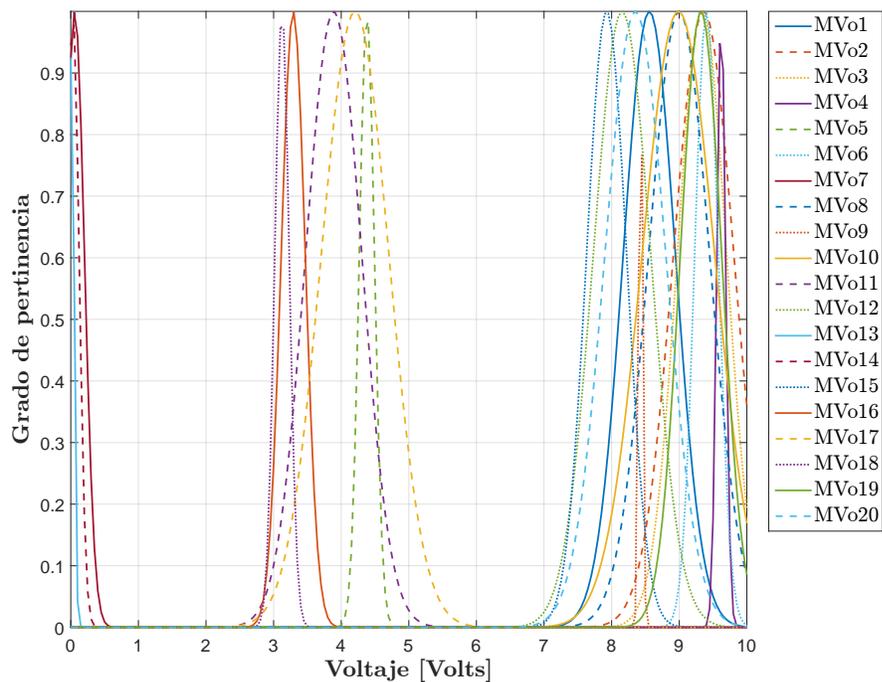


Figura A.28.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

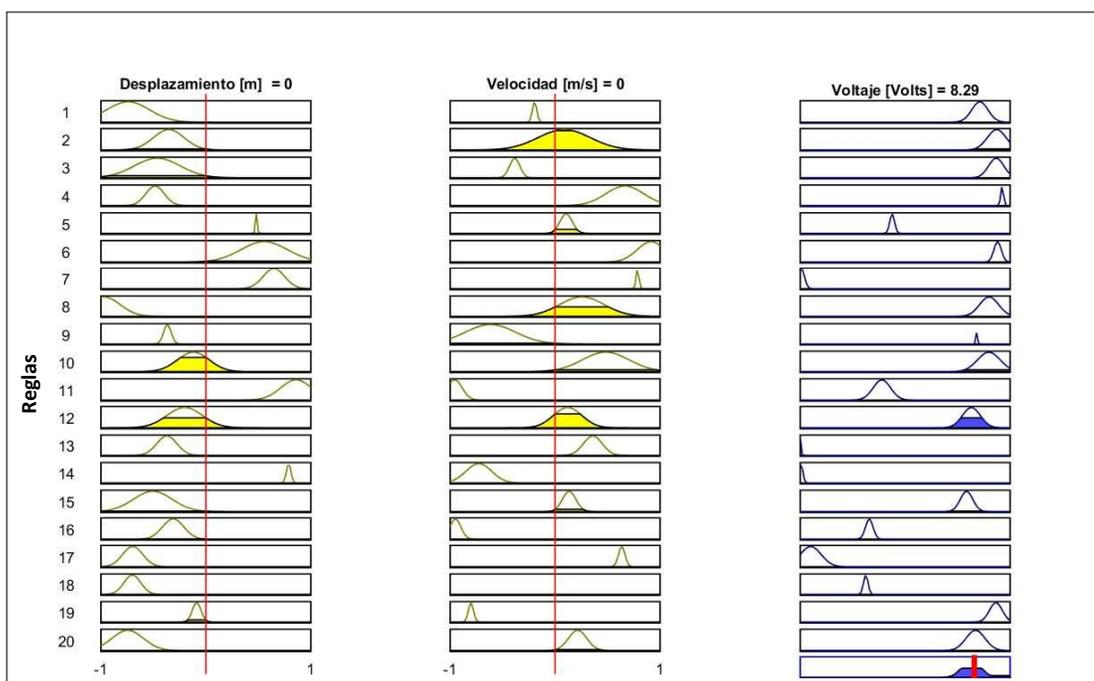


Figura A.29.: Sistema de inferencia para el controlador-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

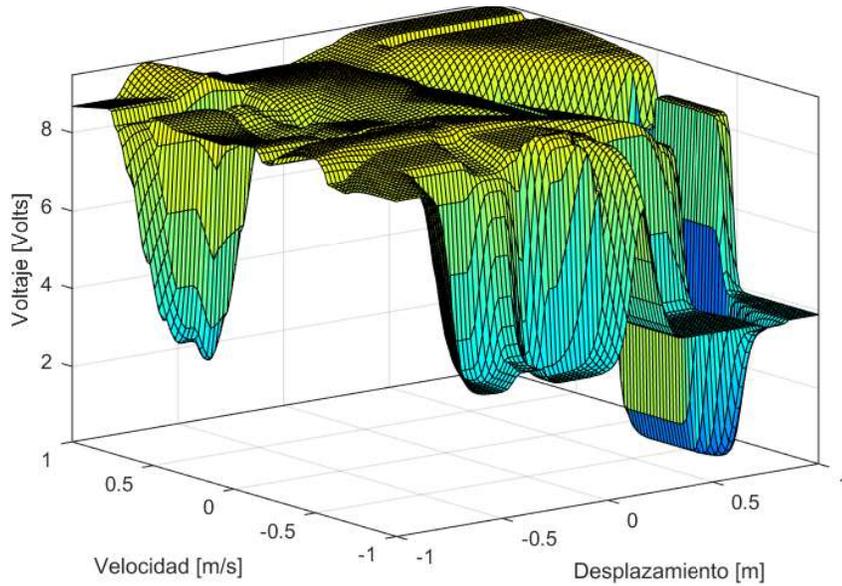


Figura A.30.: Superficie difusa para el controlador-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

A.1.7. Sismo: Italia

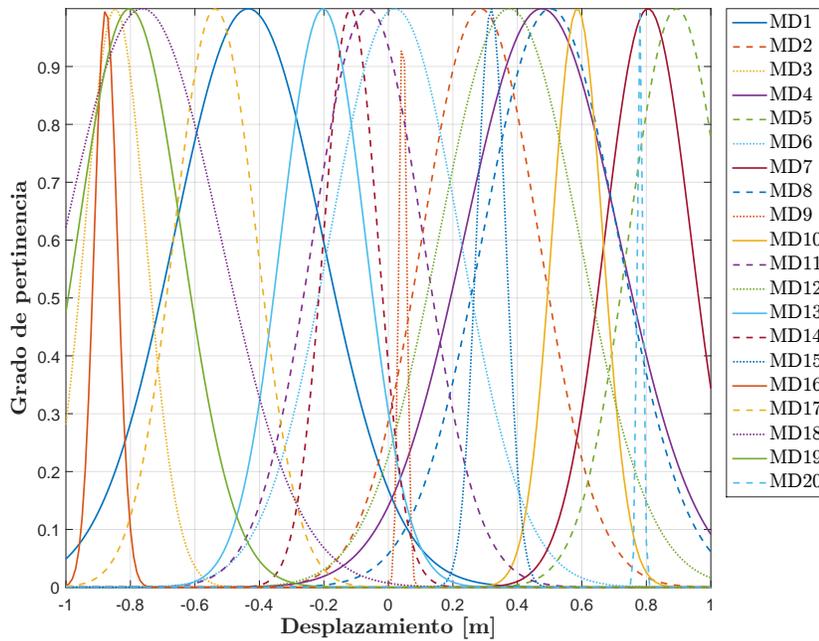


Figura A.31.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Italia
Fuente: Autor

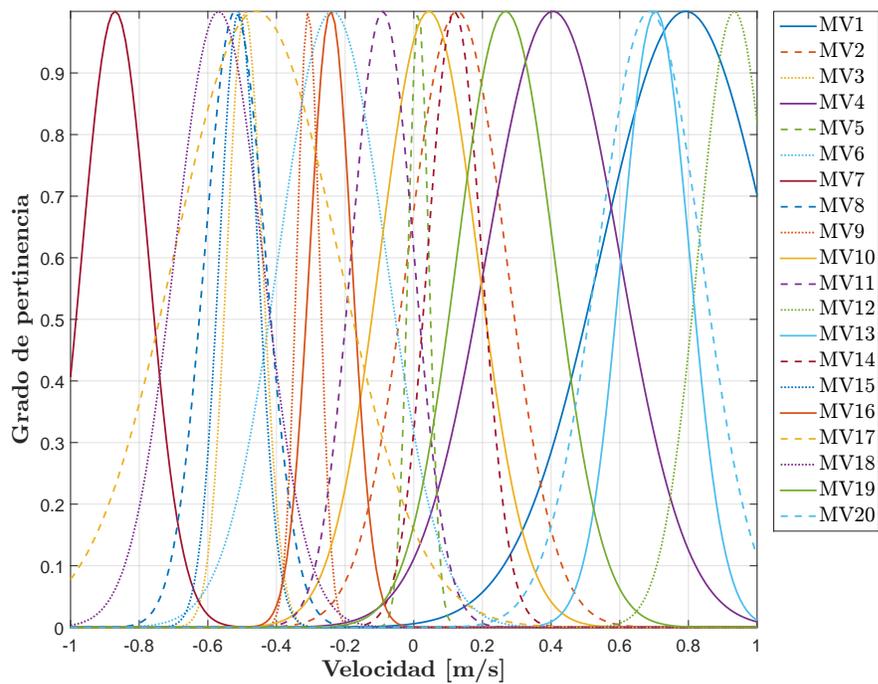


Figura A.32.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Italia
Fuente: Autor

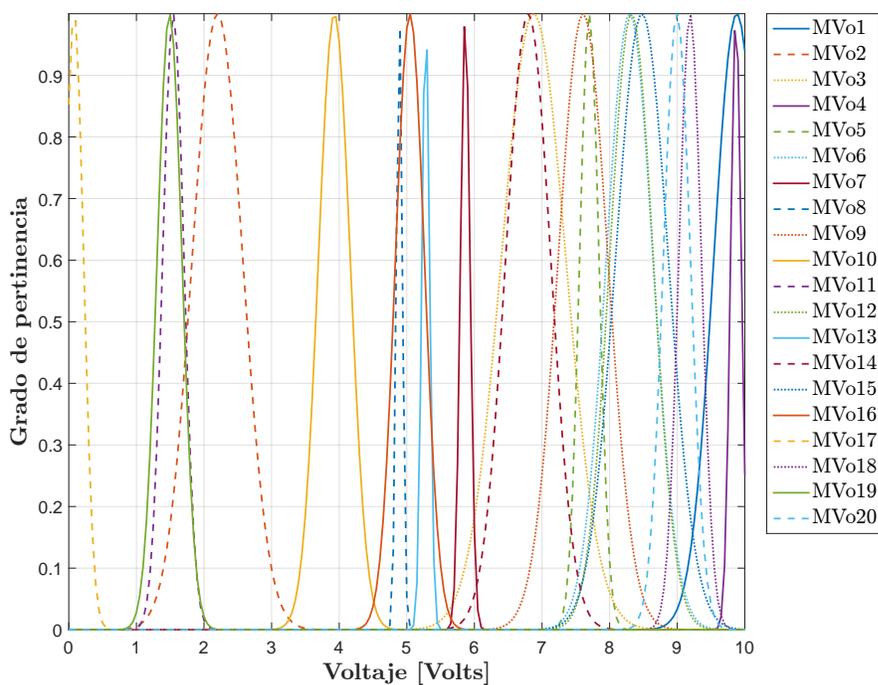


Figura A.33.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Italia
Fuente: Autor

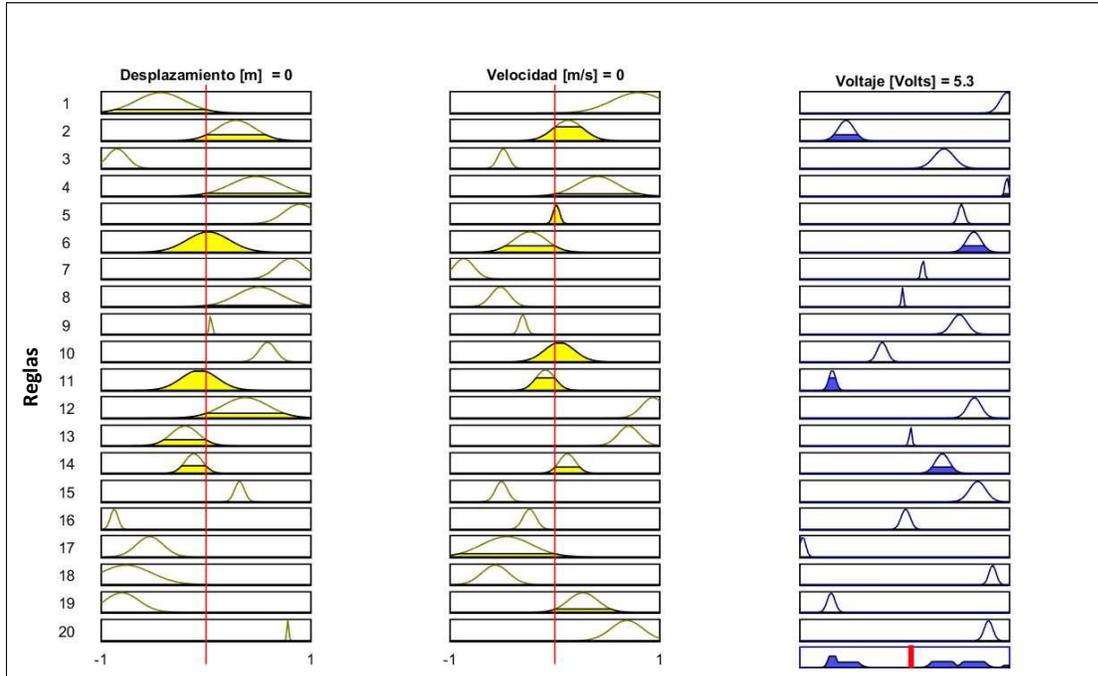


Figura A.34.: Sistema de inferencia para el controlador-Italia
Fuente: Autor

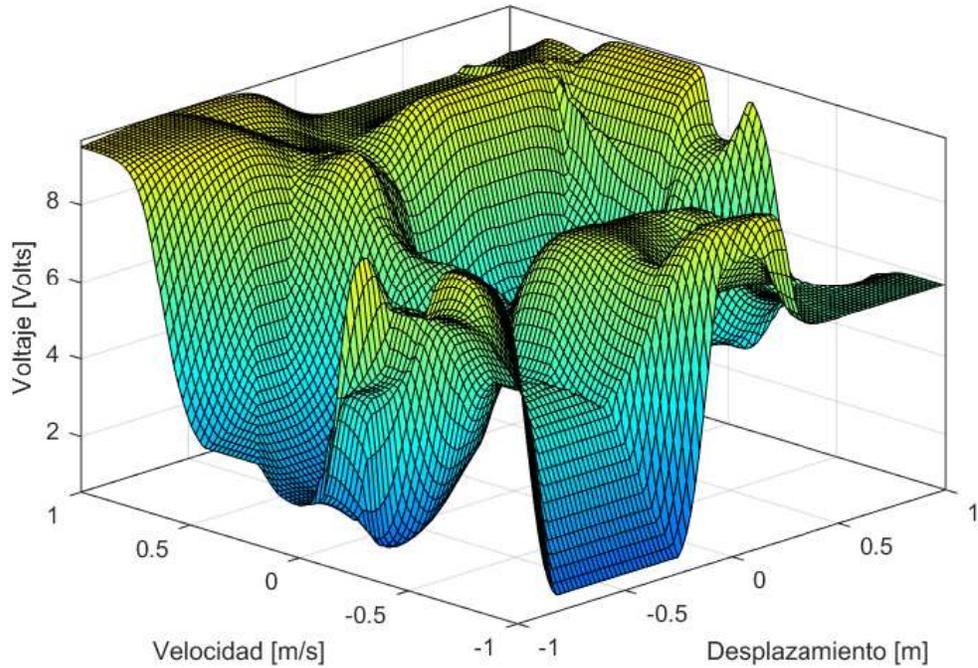


Figura A.35.: Superficie difusa para el controlador-Italia
Fuente: Autor

A.2. Caso de estudio No. 2

A.2.1. Sismo: El Centro

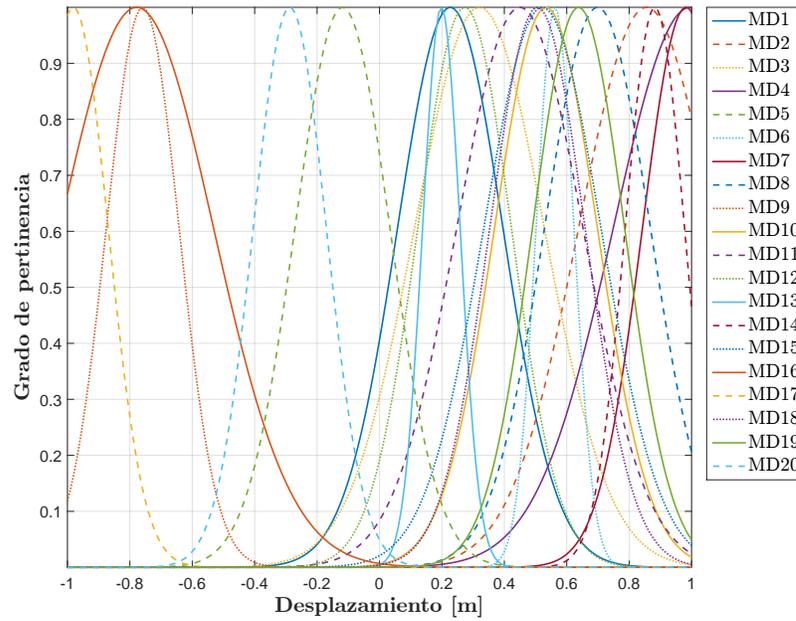


Figura A.36.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-El Centro

Fuente: Autor

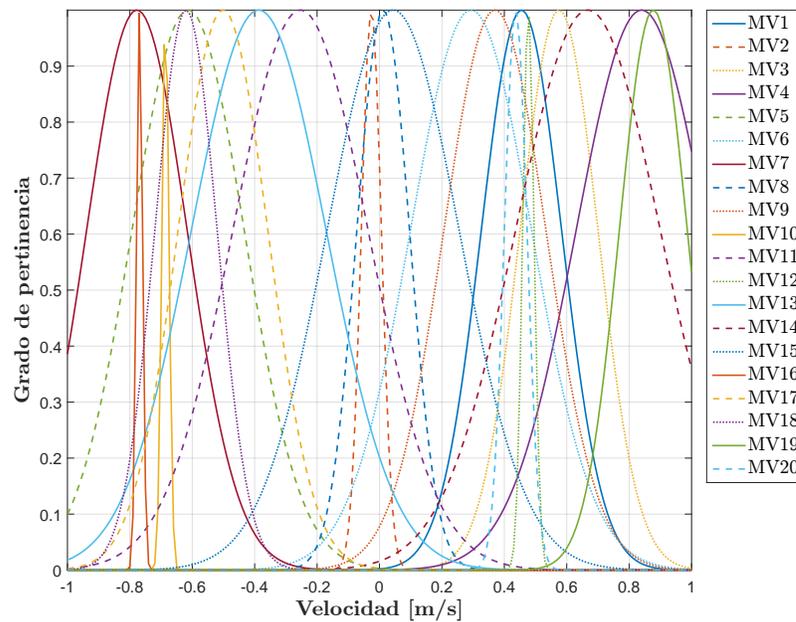


Figura A.37.: Funciones de pertinencia para la velocidad-El Centro

Fuente: Autor

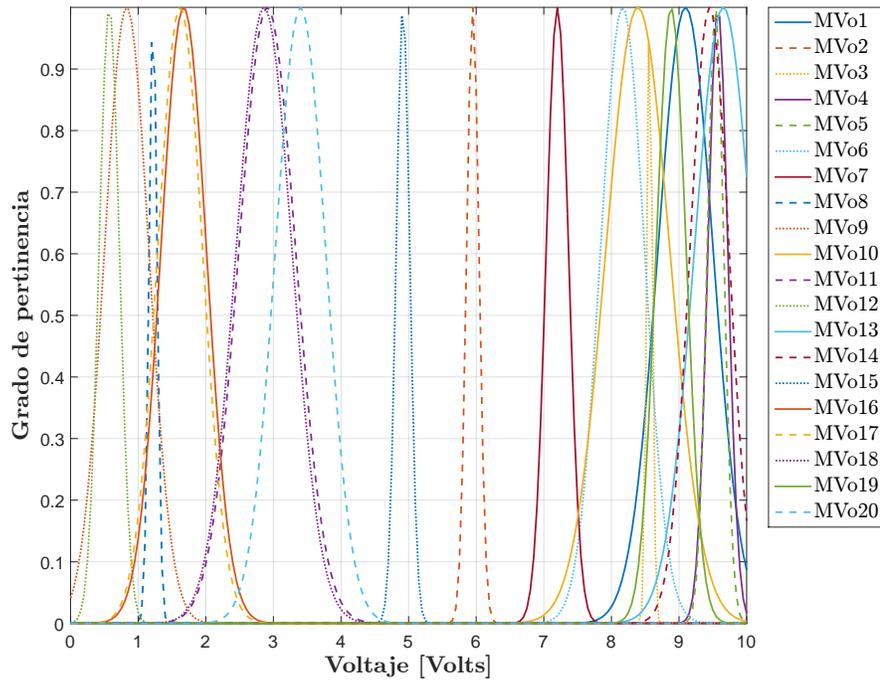


Figura A.38.: Funciones de pertinencia para el voltaje-El Centro
Fuente: Autor

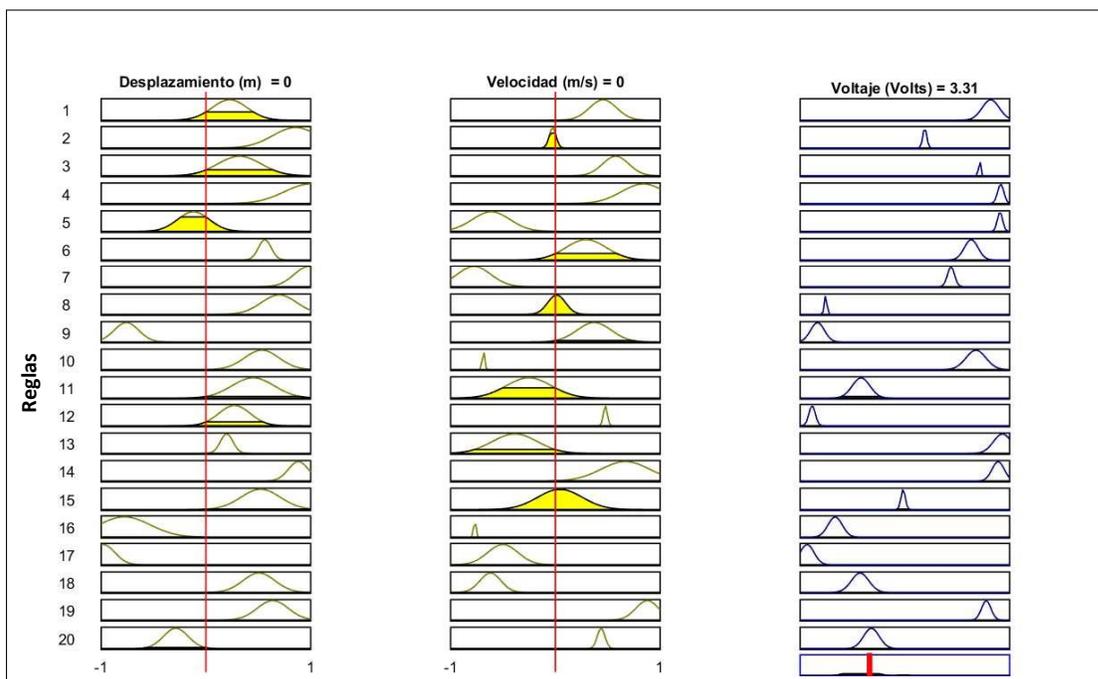


Figura A.39.: Sistema de inferencia para el controlador-El Centro
Fuente: Autor

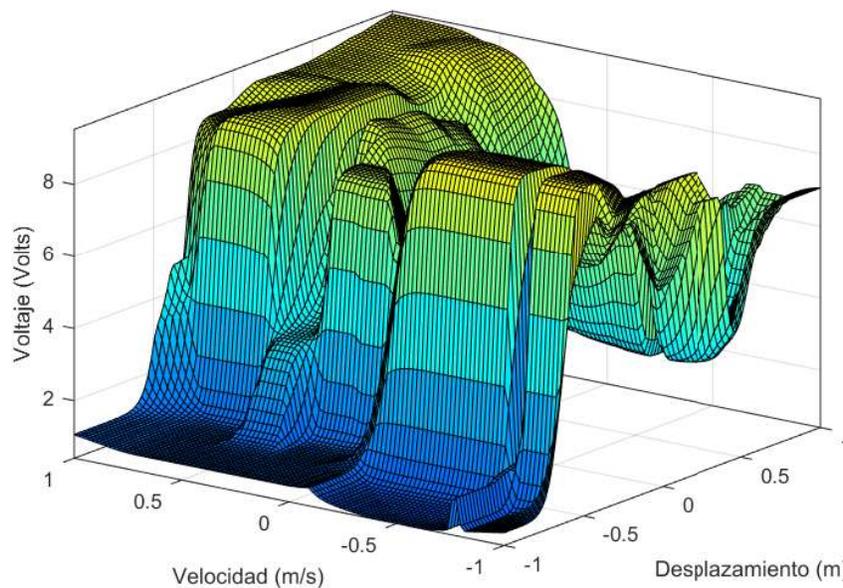


Figura A.40.: Superficie difusa para el controlador-El Centro
Fuente: Autor

A.2.2. Sismo: Morgan Hill

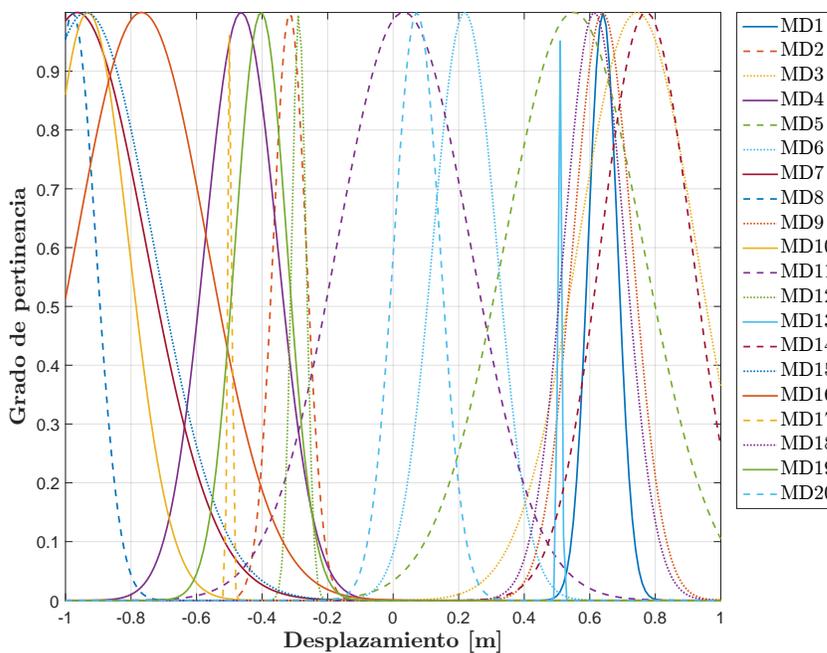


Figura A.41.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-M. Hill
Fuente: Autor

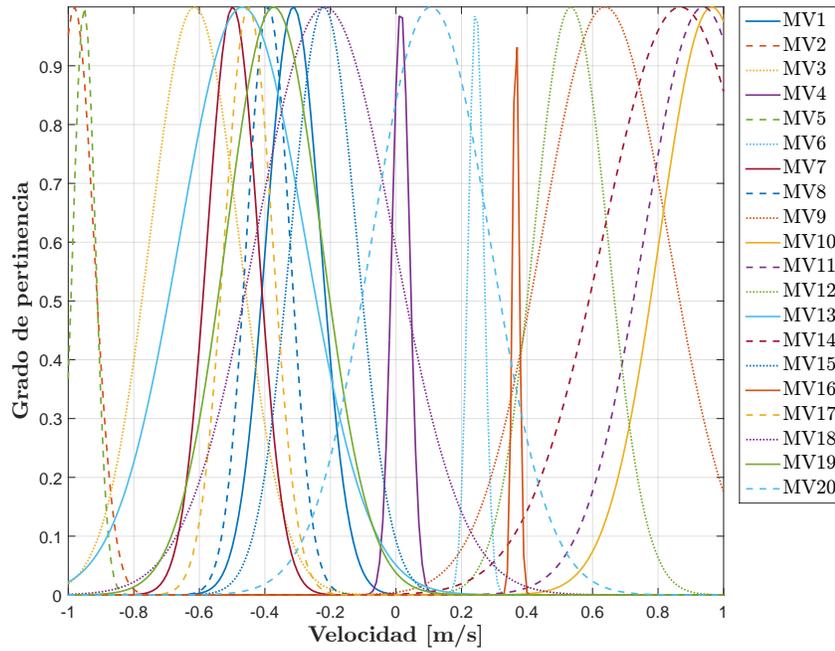


Figura A.42.: Funciones de pertinencia para la velocidad-M. Hill
Fuente: Autor

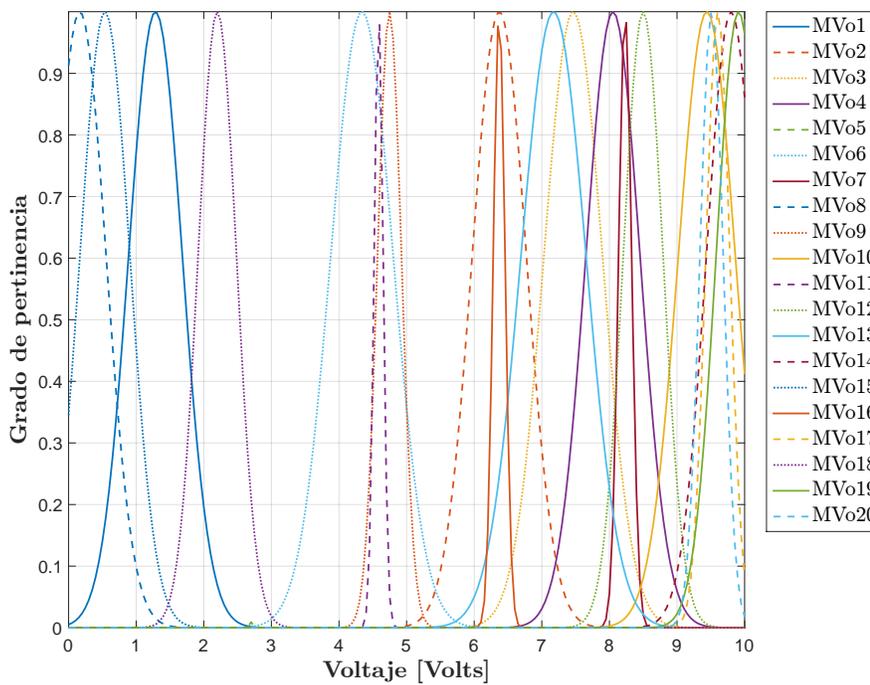


Figura A.43.: Funciones de pertinencia para el voltaje-M. Hill
Fuente: Autor

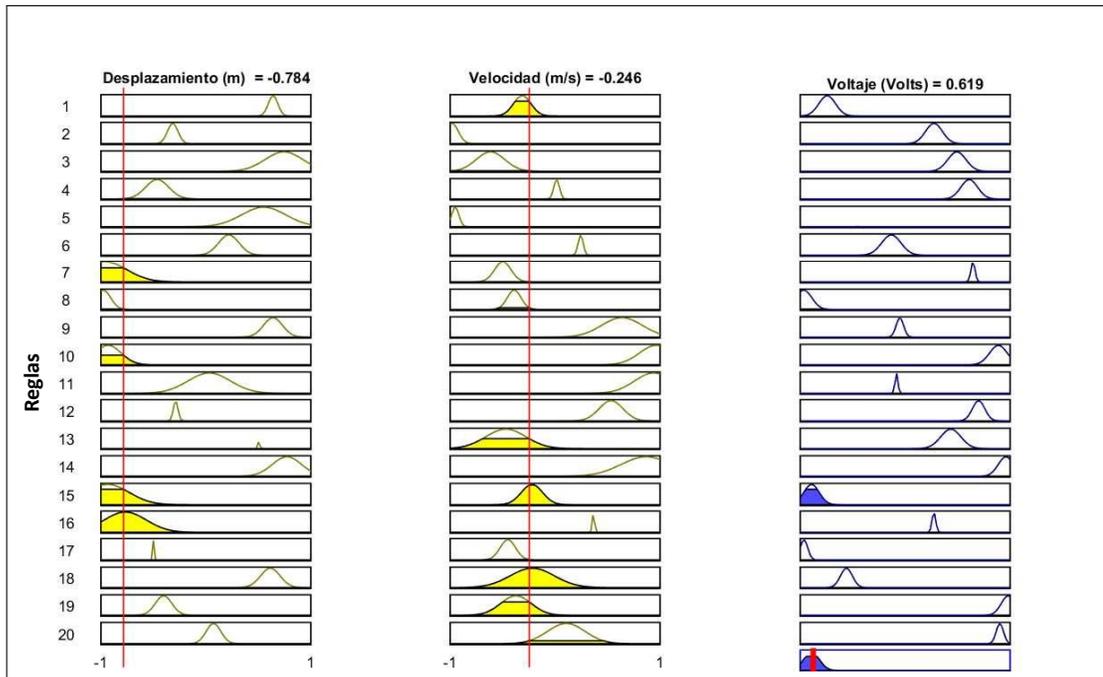


Figura A.44.: Sistema de inferencia para el controlador-M. Hill
Fuente: Autor

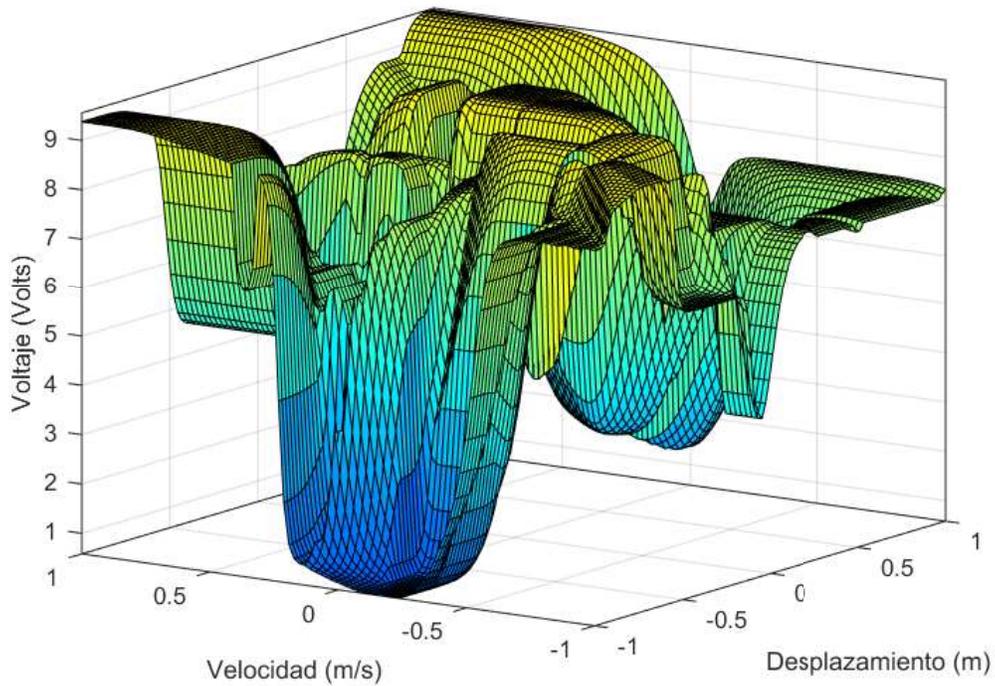


Figura A.45.: Superficie difusa para el controlador-M. Hill
Fuente: Autor

A.2.3. Sismo: Petrolia

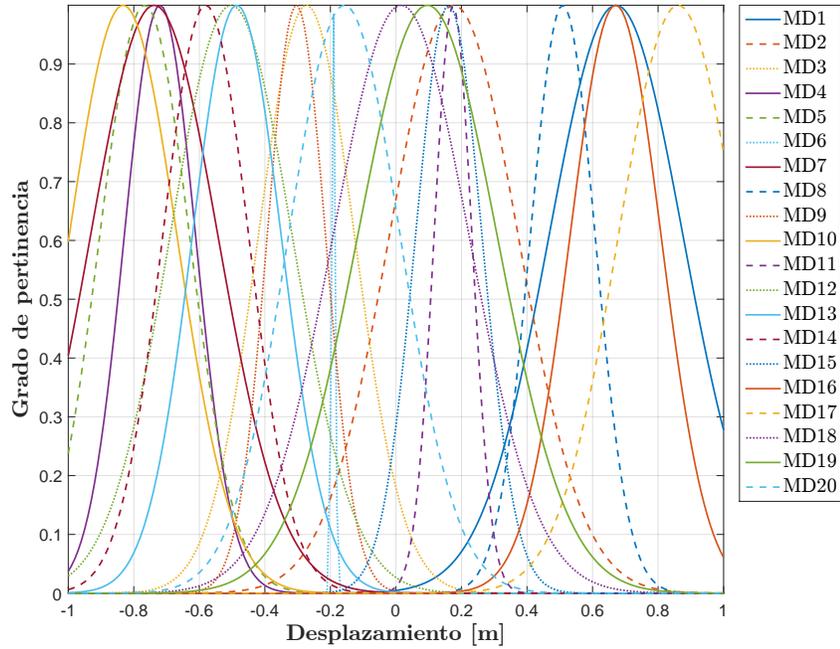


Figura A.46.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Petrolia
Fuente: Autor

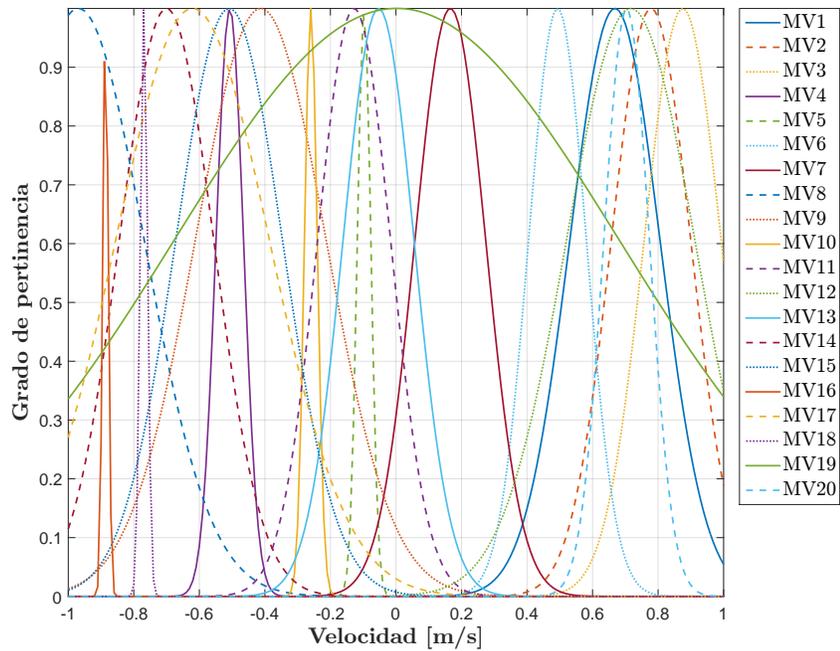


Figura A.47.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Petrolia
Fuente: Autor

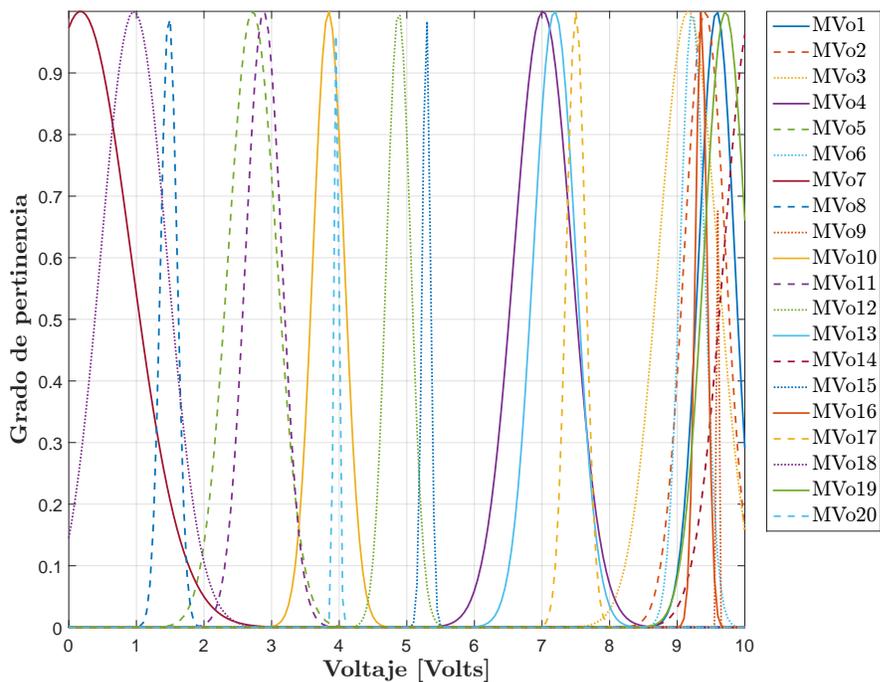


Figura A.48.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Petrolia
Fuente: Autor

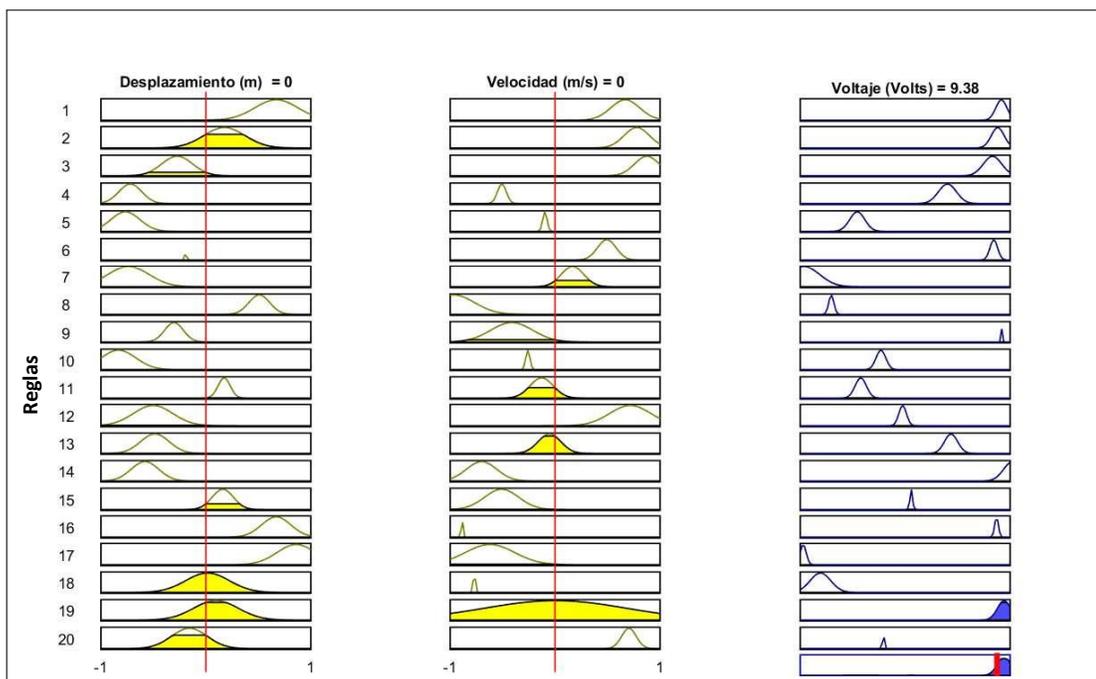


Figura A.49.: Sistema de inferencia para el controlador-Petrolia
Fuente: Autor

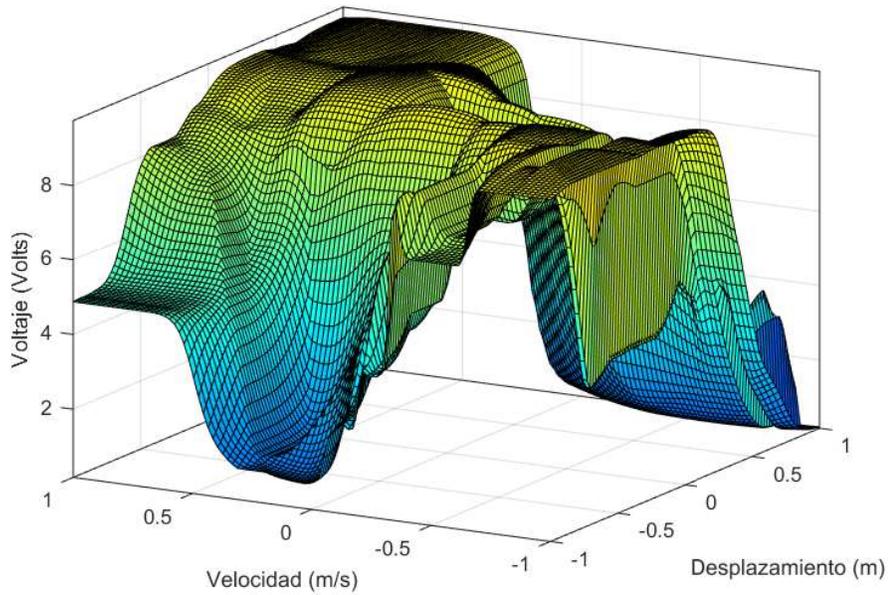


Figura A.50.: Superficie difusa para el controlador-Petrolia
Fuente: Autor

A.2.4. Sismo: Northridge

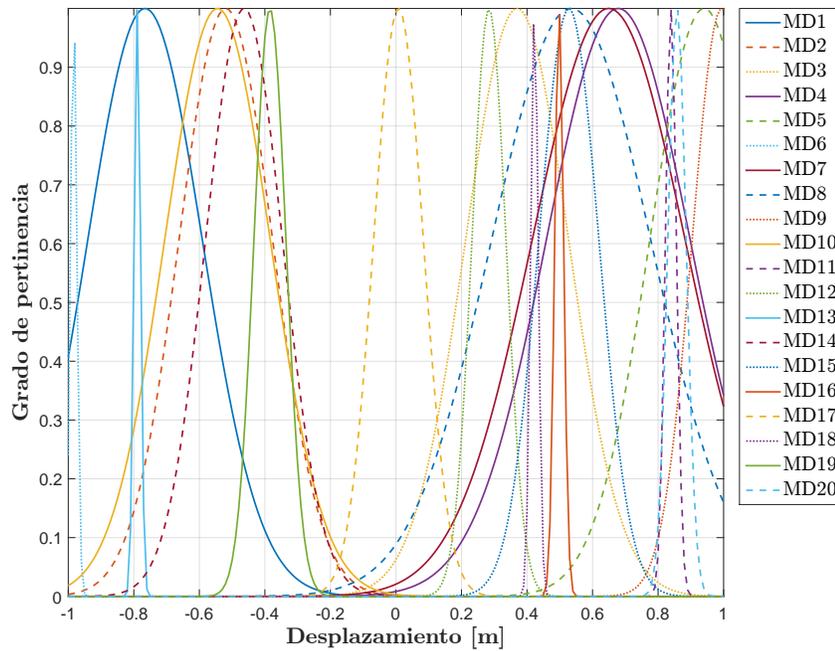


Figura A.51.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Northridge
Fuente: Autor

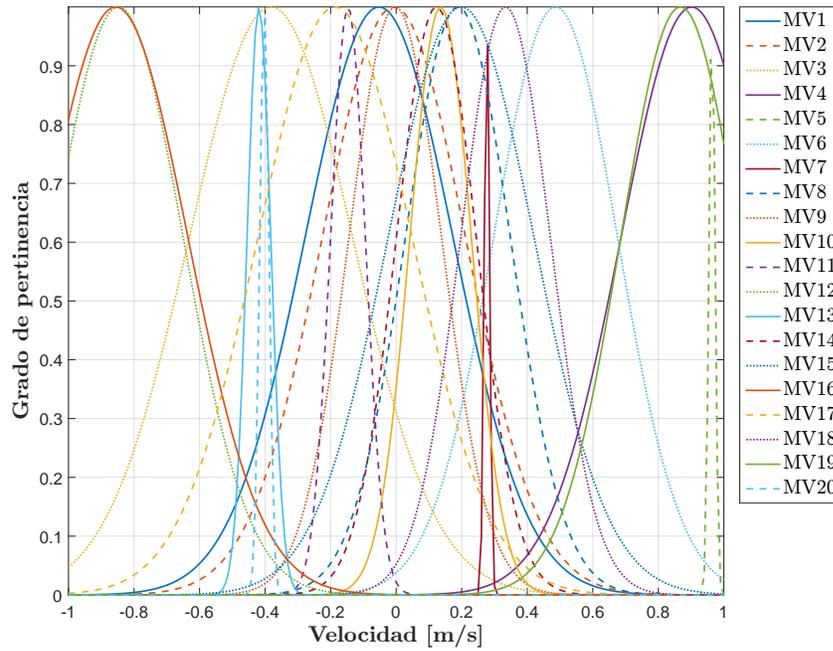


Figura A.52.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Northridge
Fuente: Autor

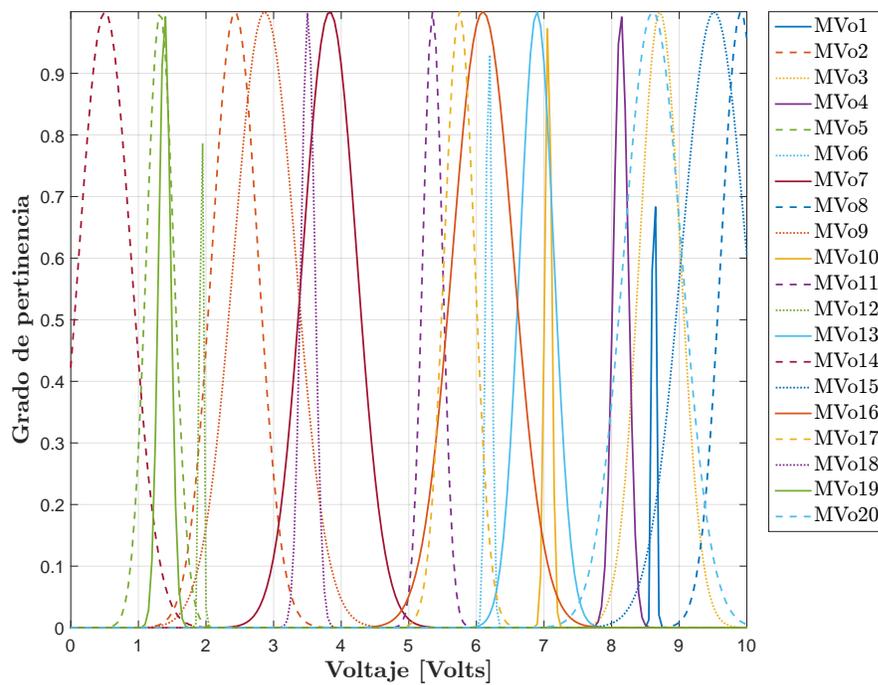


Figura A.53.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Northridge
Fuente: Autor

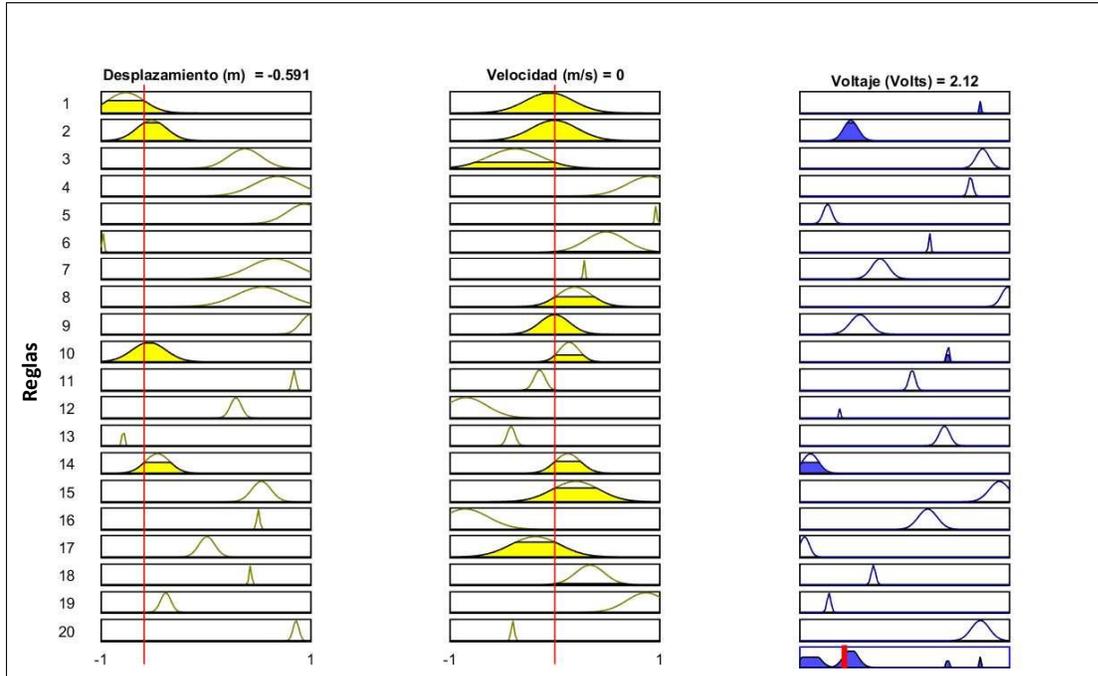


Figura A.54.: Sistema de inferencia para el controlador-Northridge
Fuente: Autor

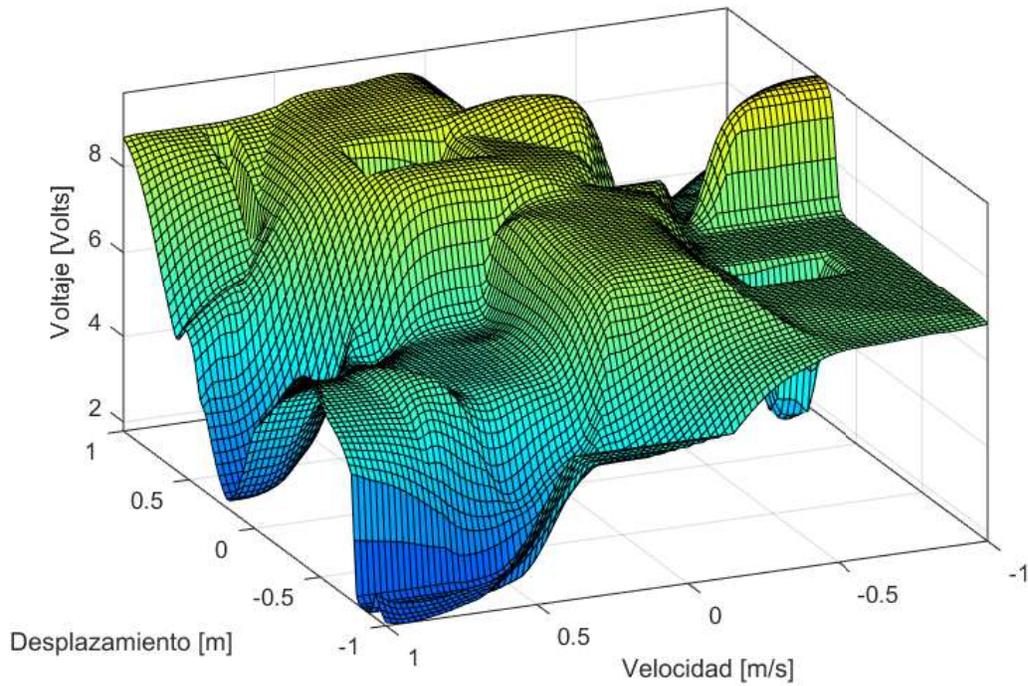


Figura A.55.: Superficie difusa para el controlador-Northridge
Fuente: Autor

A.2.5. Sismo: Kobe

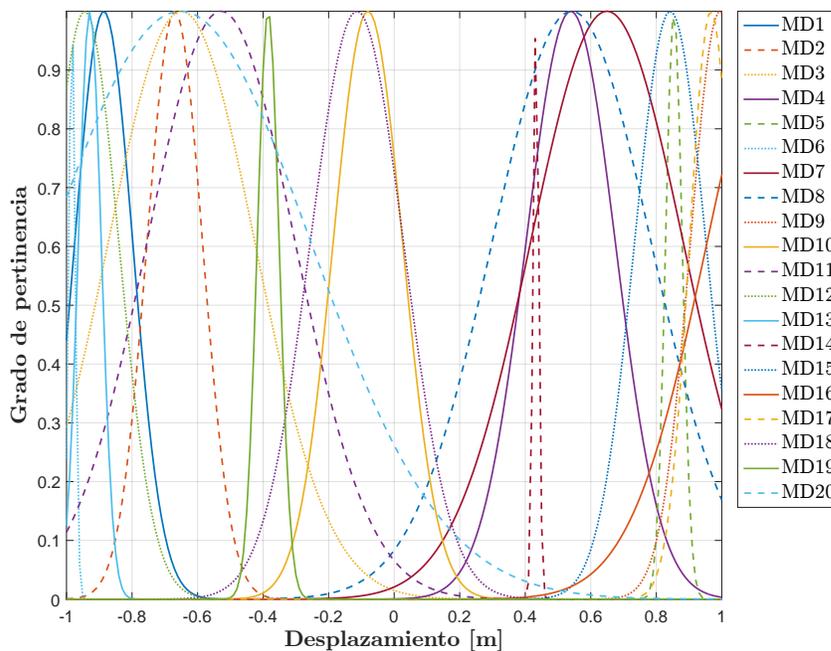


Figura A.56.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Kobe
Fuente: Autor

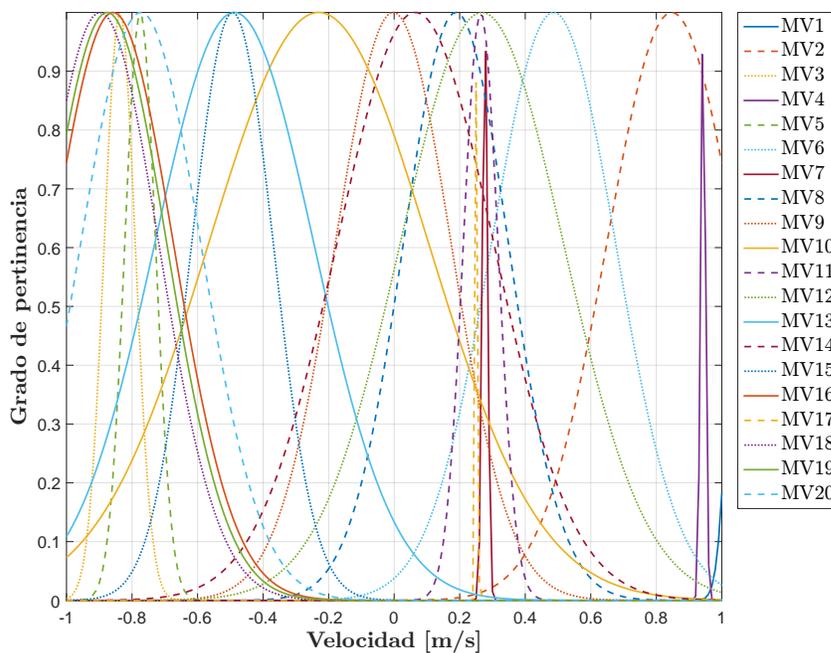


Figura A.57.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Kobe
Fuente: Autor

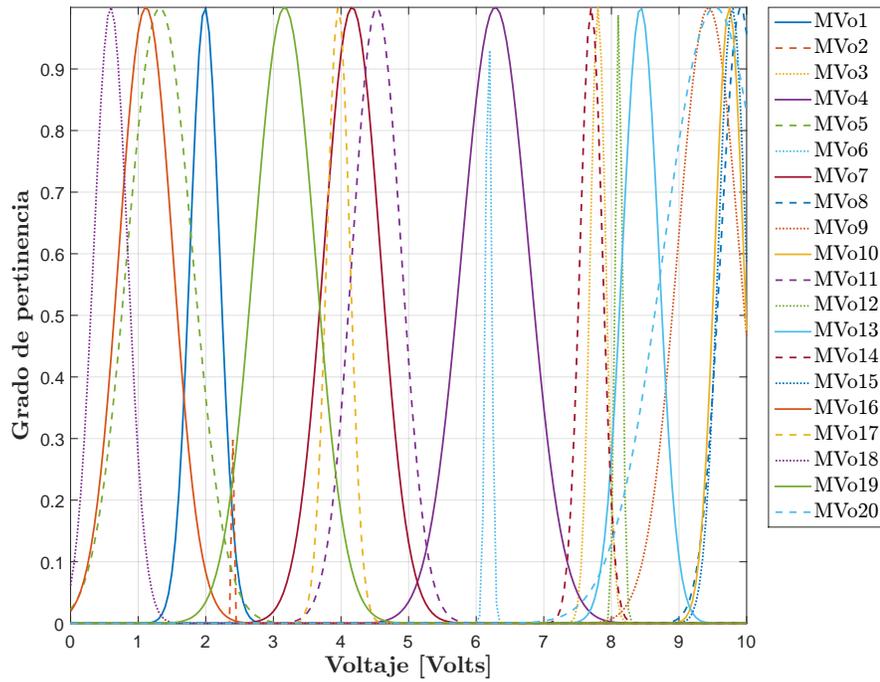


Figura A.58.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Kobe
Fuente: Autor

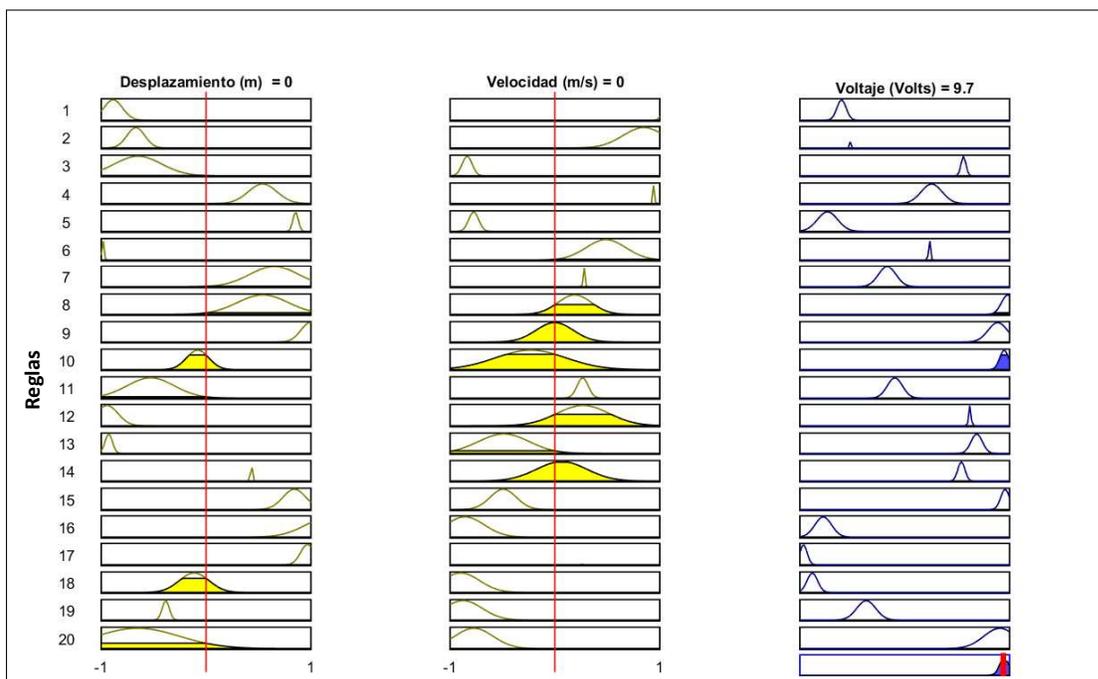


Figura A.59.: Sistema de inferencia para el controlador-Kobe
Fuente: Autor

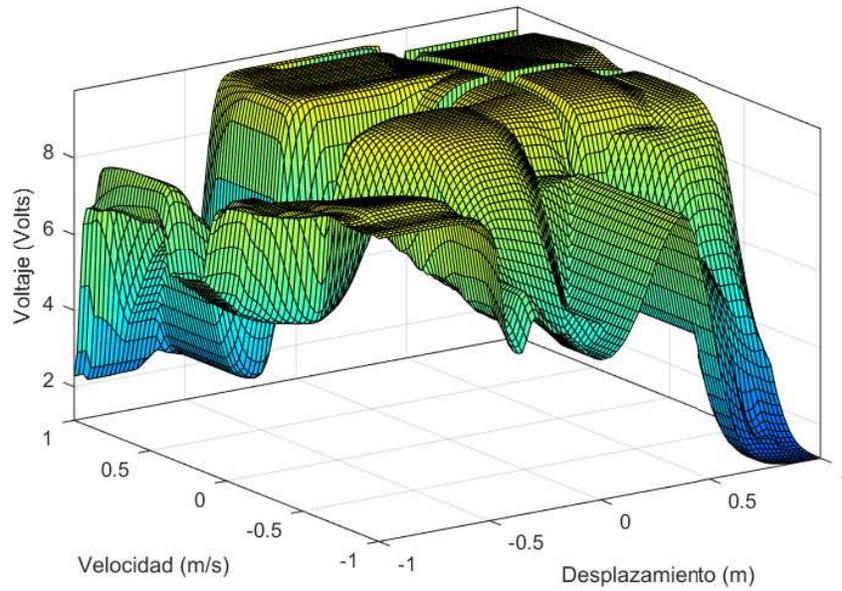


Figura A.60.: Superficie difusa para el controlador-Kobe
Fuente: Autor

A.2.6. Sismo: Nueva Zelanda

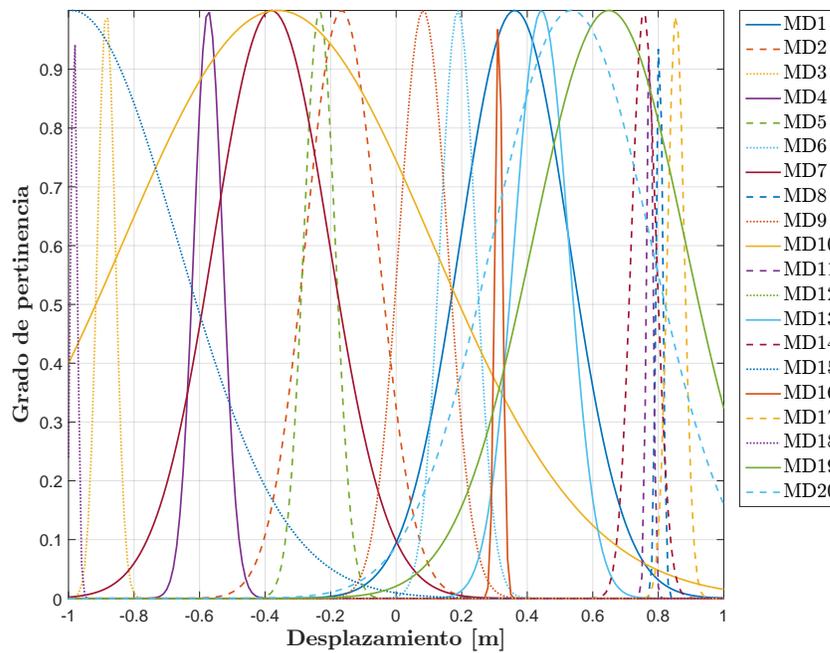


Figura A.61.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

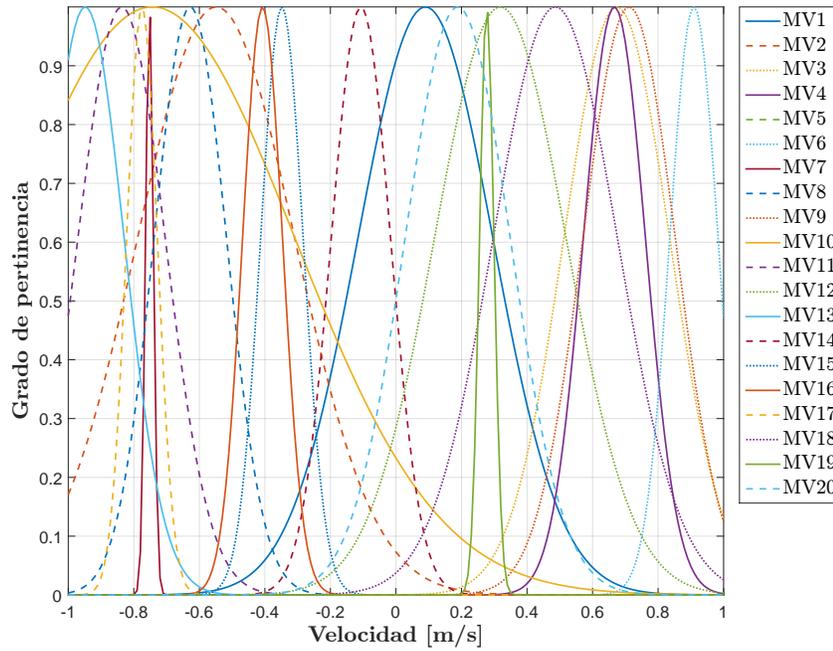


Figura A.62.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Nueva Zelanda

Fuente: Autor

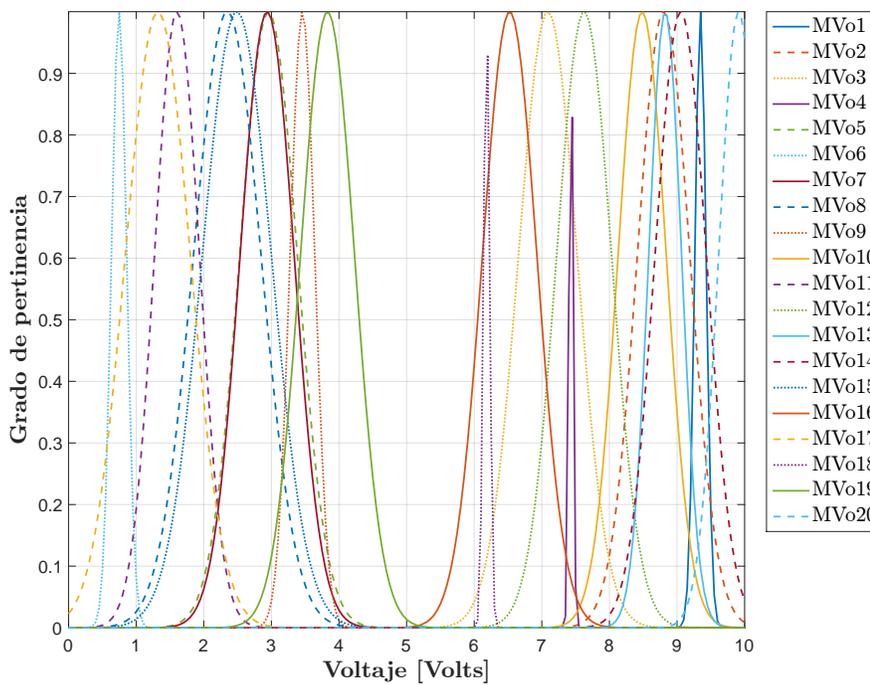


Figura A.63.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Nueva Zelanda

Fuente: Autor

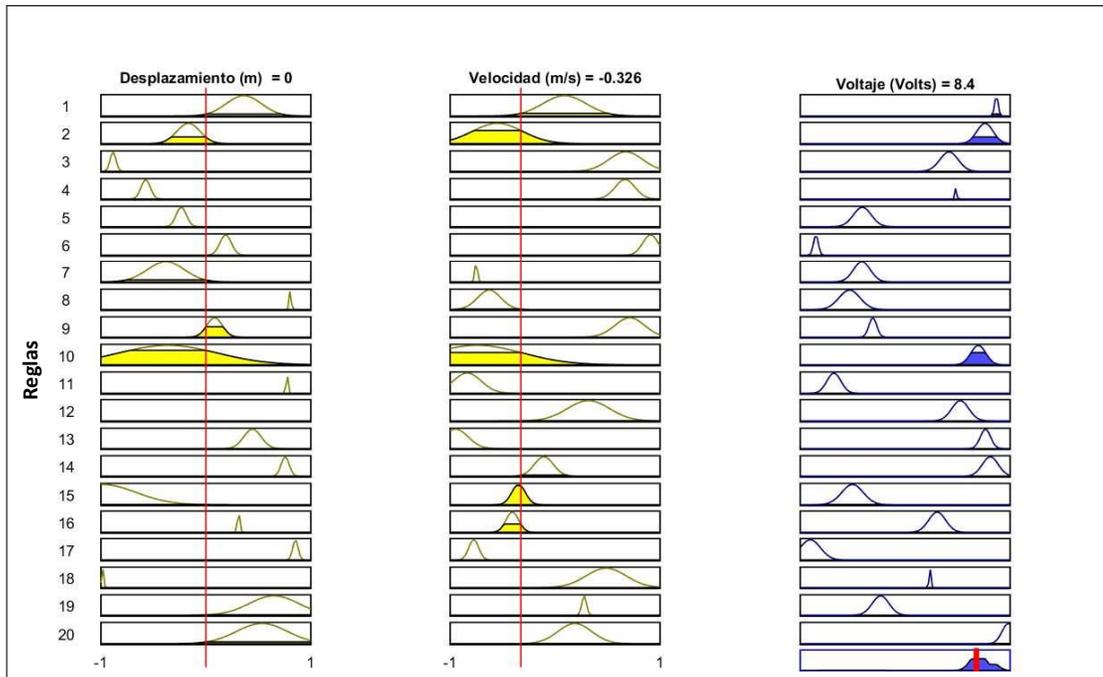


Figura A.64.: Sistema de inferencia para el controlador-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

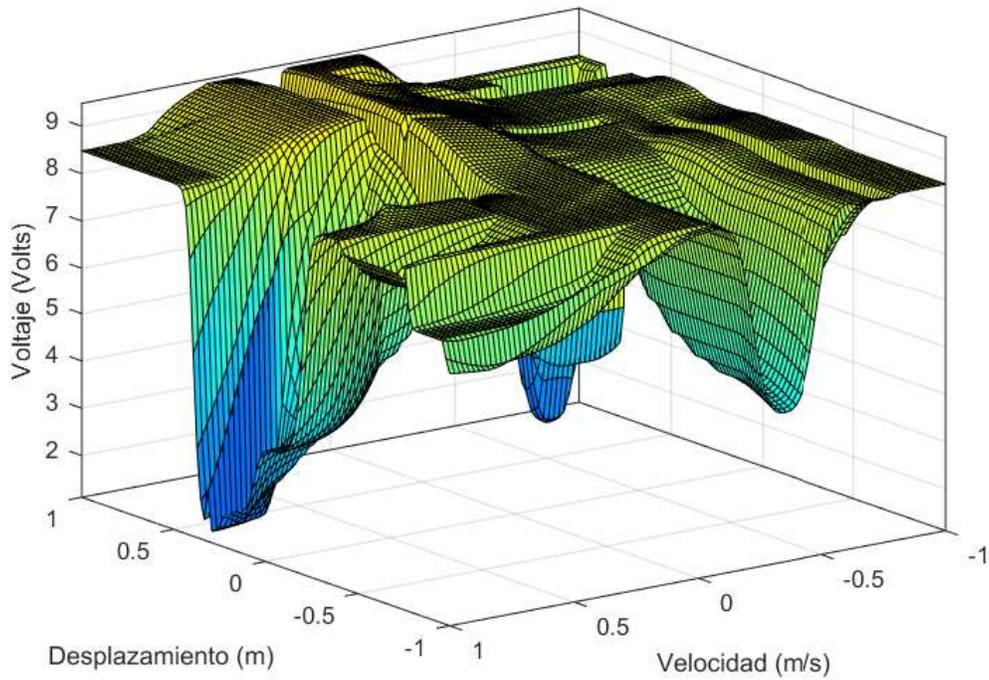


Figura A.65.: Superficie difusa para el controlador-Nueva Zelanda
Fuente: Autor

A.2.7. Sismo: Italia

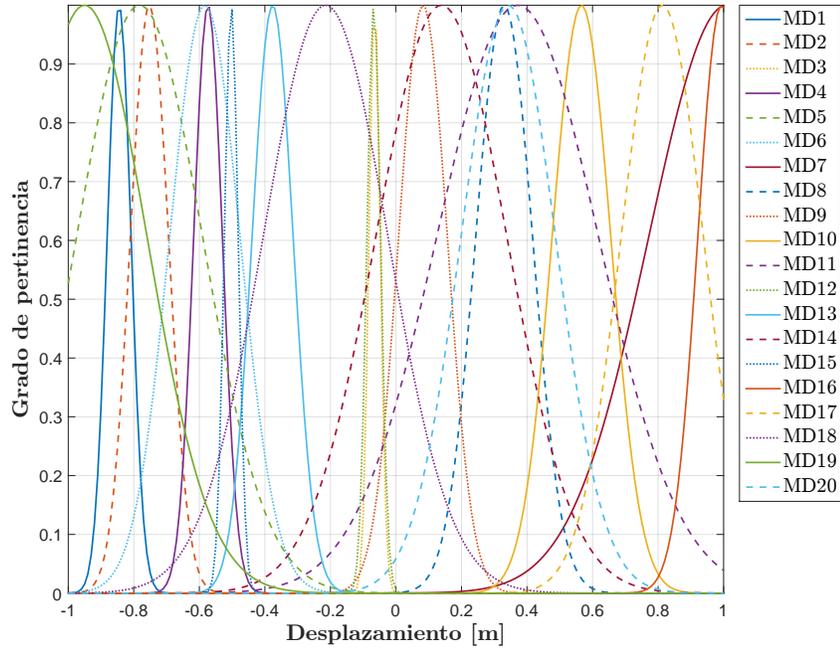


Figura A.66.: Funciones de pertinencia para el desplazamiento-Italia
Fuente: Autor

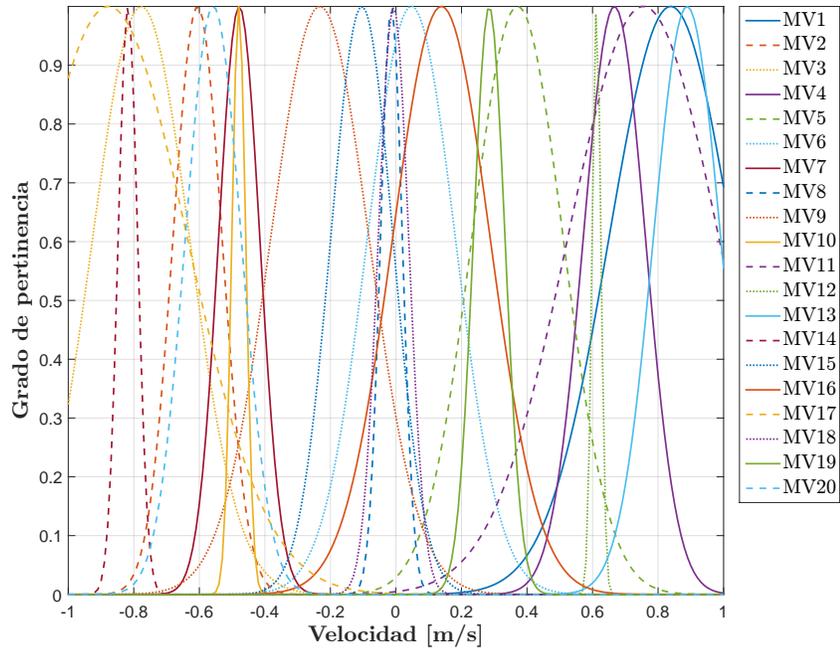


Figura A.67.: Funciones de pertinencia para la velocidad-Italia
Fuente: Autor

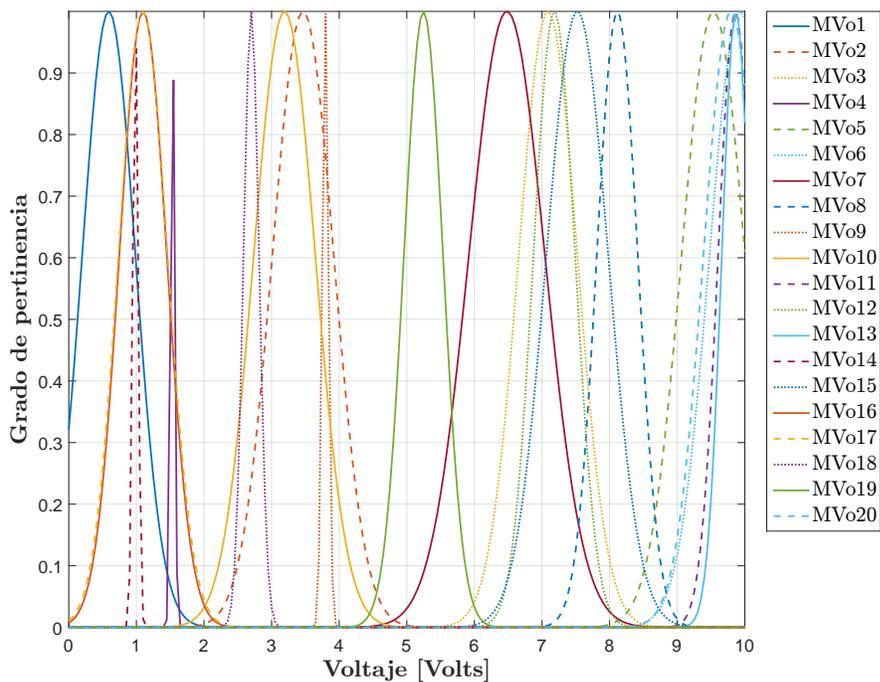


Figura A.68.: Funciones de pertinencia para el voltaje-Italia
Fuente: Autor

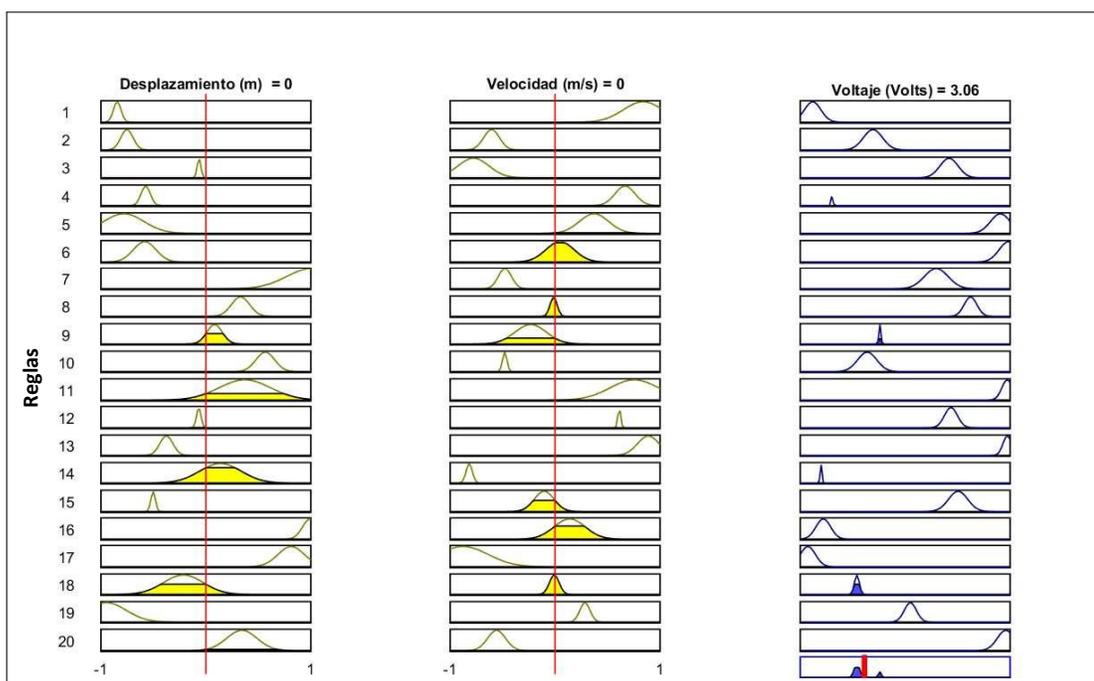


Figura A.69.: Sistema de inferencia para el controlador-Italia
Fuente: Autor

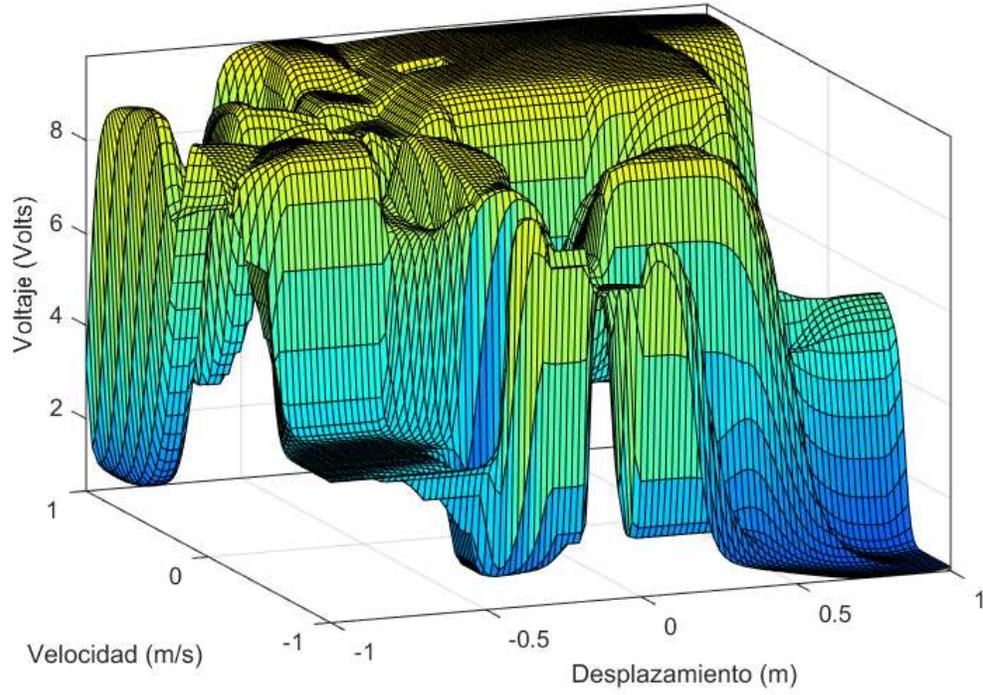


Figura A.70.: Superficie difusa para el controlador-Italia
Fuente: Autor

Bibliografía

- [1] M. Bitaraf, O. E. Ozbulut, S. Hurlebaus, and L. Barroso, “Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 10, pp. 3040–3047, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.05.023>
- [2] S. Hurlebaus and L. Gaul, “Smart structure dynamics,” vol. 20, pp. 255–281, 2006.
- [3] J. T. Yao, “Concept of structural control,” *J. Struct. Div.*, pp. 1567–1574, 1972.
- [4] D. A. Shook, P. N. Roschke, P. Y. Lin, and C. H. Loh, “GA-optimized fuzzy logic control of a large-scale building for seismic loads,” *Eng. Struct.*, vol. 30, no. 2, pp. 436–449, 2008.
- [5] D. Gomez, J. Marulanda, and P. Thomson, “Control systems for dynamic loading protection of civil structures,” *Dyna-Colombia*, vol. 75, no. 155, pp. 77–89, 2008.
- [6] H. Kim and H. Adeli, “Hybrid control of irregular steel highrise building structures under seismic excitations,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 63, pp. 1757–1774, jul 2005.
- [7] L. Gaul, S. Hurlebaus, J. Wirnitzer, and H. Albrecht, “Enhanced damping of light-weight structures by semi-active joints,” *Acta Mech.*, vol. 195, no. 1-4, pp. 249–261, 2008.
- [8] H. S. Kim and J. W. Kang, “Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm,” *Eng. Struct.*, vol. 41, pp. 242–257, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.038>
- [9] J. Horn, N. Nafpliotis, and D. E. Goldberg, “A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization,” in *Proc. first IEEE Conf. Evol. Comput. IEEE world Congr. Comput. Intell.* Ieee, 1994, pp. 82–87.
- [10] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.

- [11] Y. Liu, F. Gordaninejad, C. A. Evrensel, and G. H. Hitchcock, “<title>Experimental study on fuzzy logic vibration control of a bridge using fail-safe magnetorheological fluid dampers</title>,” *Smart Struct. Mater. 2001 Smart Syst. Bridg. Struct. Highw.*, vol. 4330, pp. 281–288, 2001.
- [12] J. Housner, G., Bergman, L., Caughey, T., Chassiakos, A., Claus, R., Masri, S., Skelton, R., Soong, T., Spencer, B. and Yao, “Structural control: Past, present and future,” *J. engi-neering Mech.*, pp. 897–971, 1997.
- [13] E. S. Blake and E. N. Rappaport, “The deadliest, costliest, and most intense United States tropical cyclones from 1851 to 2006 (and other frequently requested hurricane facts),” *NOAA Technical Memo. NWS TPC-5*, vol. 2006, no. August, pp. 1–45, 2001. [Online]. Available: [#](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:THE+DEADLIEST,+COSTLIEST,+AND+MOST+INTENSE+UNITED+STATES+TROPICAL+CYCLONES+FROM+1851+TO+2006)0
- [14] G. Yang, “Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration, mitigation: Modeling: Testing and control,” *Ph. D. Diss. Notre Dame Univ.*, 2001.
- [15] D. Karnopp, M. J. Crosby, and R. A. Harwood, “Vibration control using semi-active force generators,” 1974.
- [16] D. Hrovat, P. Barak, and M. Rabins, “Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control,” *J. Eng. Mech.*, vol. 109, no. 3, pp. 691–705, 1983.
- [17] H. Yoshioka, J. C. Ramallo, and B. F. Spencer Jr, ““Smart” base isolation strategies employing magnetorheological dampers,” *J. Eng. Mech.*, vol. 128, no. 5, pp. 540–551, 2002.
- [18] Y. Y. Okamoto K, Tabei R, Fukushima M, Nosaka S, “NII-Electronic Library Service,” *Chem. Pharm. Bull.*, no. 43, p. 2091, 1970. [Online]. Available: <http://www.mendeley.com/research/geology-volcanic-history-eruptive-style-yakedake-volcano-group-central-japan/>
- [19] E. A. Johnson, R. E. Christenson, and B. F. Spencer, “Semiaactive damping of cables with sag,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 132–146, 2003.
- [20] S. J. Dyke, B. F. Spencer, M. K. Sain, and J. D. Carlson, “An experimental study of MR dampers for seismic protection,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 7, no. 5, pp. 693–703, 1998.
- [21] S. J. Dyke and B. F. Spencer, “A comparison of semi-active control strategies for the MR damper,” *Proc. - Intell. Inf. Syst. IIS 1997*, no. 6, pp. 580–584, 1997.

- [22] S. Dyke, B. Spencer, M. Sain, and J. Carlson, "Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 29, no. 1, pp. 5530–5535, 1996.
- [23] S. J. Dyke, B. F. Spencer, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart Mater. Struct.*, vol. 5, no. 5, pp. 565–575, 1996.
- [24] S. J. Dyke, "Acceleration feedback control strategies for active and semi-active control systems: Modeling, algorithm development, and experimental verification." 1997.
- [25] M. Kerboua, M. Benguediab, A. Megnounif, K. H. Benrahou, and F. Kaoulala, "Semi active control of civil structures, analytical and numerical studies," *Phys. Procedia*, vol. 55, pp. 301–306, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.044>
- [26] M. D. Symans and M. C. Constantinou, "Semi-active control systems for seismic protection of structures: A state-of-the-art review," *Eng. Struct.*, vol. 21, no. 6, pp. 469–487, 1999.
- [27] G. Yang, "MITIGATION: MODELING, TESTING AND CONTROL," Ph.D. dissertation, University of Notre Dame, 2001.
- [28] FENG and Q., "Use of a Variable Damper for Hybrid Control of Bridge Response under Earthquake," *Proc. U.S. Natl. Work. Struct. Control Res.*, 1990. [Online]. Available: <http://ci.nii.ac.jp/naid/10006922731/en/>
- [29] L. A. Lara V, "Estudo de Algoritmo de Controle Semi-Ativo Aplicados a Amortecedores," p. 223, 2011.
- [30] Z. Akbay and H. M. Aktan, "Actively regulated friction slip devices," in *Proc. 6th Can. Conf. Earthq. Engrg.*, 1991, pp. 367–374.
- [31] S. Kannan, H. M. Uras, and H. M. Aktan, "Active control of building seismic response by energy dissipation," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 24, no. 5, pp. 747–759, 1995.
- [32] F. Sadek and B. Mohraz, "Semiactive control algorithms for structures with variable dampers," *J. Eng. Mech.*, vol. 124, no. 9, pp. 981–990, 1998.
- [33] J. M. Roësset and J. T. Yao, "State of the Art of Structural Engineering," *Perspect. Civ. Eng. Commem. 150th Anniv. Am. Soc. Civ. Eng.*, no. July, pp. 131–141, 2003.
- [34] S. K. Bhattacharyya, "Tuned sloshing damper in response control of tall building structure," *Proc. Indian Natl. Sci. Acad.*, vol. 82, no. 2, pp. 223–231, 2016.
- [35] M. A. Haroun, J. A. Pires, and A. Y. J. Won, "Active orifice control in hybrid liquid column dampers," in *Proc. first world Conf. Struct. Control*, vol. 1, 1994, pp. 69–78.

- [36] J. Y. K. Lou, L. D. Lutes, and J. J. Li, “Active tuned liquid damper for structural control,” in *Proc. 1st World Conf. Struct. Control*, 1994, pp. 70–79.
- [37] S. K. Yalla, A. Kareem, and J. C. Kantor, “Semi-active tuned liquid column dampers for vibration control of structures,” *Eng. Struct.*, vol. 23, no. 11, pp. 1469–1479, 2001.
- [38] B. F. Spencer Jr, G. Yang, J. D. Carlson, and M. K. Sain, “Smart dampers for seismic protection of structures: a full-scale study,” in *Proc. Second world Conf. Struct. Control*, vol. 1. Kyoto, 1998, pp. 417–426.
- [39] H. P. Gavin, R. D. Hanson, and F. E. Filisko, “Electrorheological dampers, part i: Analysis and design,” *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, vol. 63, no. 3, pp. 669–675, 1996.
- [40] —, “Electrorheological dampers, Part II: Testing and modeling,” *Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. 63, no. September 1996, 1996.
- [41] N. Makris and A. Whittaker, “Seismic protection with fluid dampers and the issue of viscous heating,” no. July 1998, 2016.
- [42] N. H. McClamroch, D. S. Oritz, H. P. Gavin, and R. D. Hanson, “Electrorheological dampers and semi-active structural control,” in *Proc. 1994 33rd IEEE Conf. Decis. Control*, vol. 1. IEEE, 1994, pp. 97–102.
- [43] H. P. Gavin, Y. D. Hose, and R. D. Hanson, “Design and control of electrorheological dampers,” in *Proc. 1st World Conf. Struct. Control*, 1994, pp. 83–92.
- [44] N. M. Kwok, Q. P. Ha, M. T. Nguyen, J. Li, and B. Samali, “Bouc–Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA,” *ISA Trans.*, vol. 46, no. 2, pp. 167–179, 2007.
- [45] R. Jacob, “The magnetic fluid clutch,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 67, no. 2, pp. 1308–1315, 1948.
- [46] Y.-Q. Guo, W.-H. Xie, and X. Jing, “Study on Structures Incorporated With MR Damping Material Based on PSO Algorithm,” *Front. Mater.*, vol. 6, p. 37, 2019. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmats.2019.00037>
- [47] S. J. Dyke, B. F. Spencer, M. K. Sain, and J. D. Carlson, “Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 5, no. 5, pp. 565–575, 1996.
- [48] K. C. Schurter and P. N. Roschke, “Neuro-fuzzy control of structures using magnetorheological dampers,” *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 2, no. October, pp. 1097–1102, 2001.

- [49] D. H. Wang and W. H. Liao, "Modeling and control of magnetorheological fluid dampers using neural networks," *Smart Mater. Struct.*, vol. 14, no. 1, pp. 111–126, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/14/1/011>
- [50] N. D. Nordin, A. G. Muthalif, and M. K. M Razali, "Control of transtibial prosthetic limb with magnetorheological fluid damper by using a fuzzy PID controller," *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, vol. 37, no. 4, pp. 1067–1078, 2018.
- [51] J. B. Jun, S. Y. Uhm, J. H. Ryu, and K. D. Suh, "Synthesis and characterization of monodisperse magnetic composite particles for magnetorheological fluid materials," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 260, no. 1-3, pp. 157–164, 2005.
- [52] M. Aslam, Y. Xiong-Liang, and D. Zhong-Chao, "Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 5, no. 3, pp. 17–29, 2006.
- [53] A. G. Olabi and A. Grunwald, "Design and application of magneto-rheological fluid," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 10, pp. 2658–2664, 2007.
- [54] M. R. Jolly, J. W. Bender, and J. D. Carlson, "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 10, no. 1, pp. 5–13, 1999.
- [55] "Magneto-Rheological (MR) Fluid." [Online]. Available: <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/magneto-rheological-mr-fluid>
- [56] E. Gedik, H. Kurt, Z. Recebli, and C. Balan, "Two-dimensional CFD simulation of magnetorheological fluid between two fixed parallel plates applied external magnetic field," *Comput. Fluids*, vol. 63, pp. 128–134, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.04.011>
- [57] W. W. Chooi and S. Olutunde Oyadiji, "Mathematical modeling, analysis, and design of magnetorheological (MR) dampers," *J. Vib. Acoust. Trans. ASME*, vol. 131, no. 6, pp. 0610021–06100210, 2009.
- [58] J. P. Hartnett and M. Kostic, "Heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in rectangular ducts," in *Adv. heat Transf.* Elsevier, 1989, vol. 19, pp. 247–356.
- [59] H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, *An introduction to rheology*. Elsevier, 1989, vol. 3.
- [60] A. Yahia and K. H. Khayat, "Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 5, pp. 731–738, 2001.

- [61] C. F. Ferraris, “Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 104, no. 5, p. 461, 1999.
- [62] S. A. Khan, A. Suresh, and N. SeethaRamaiah, “Principles, Characteristics and Applications of Magneto Rheological Fluid Damper in Flow and Shear Mode,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpc, pp. 1547–1556, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.136>
- [63] J. D. Carlson and B. F. Spencer Jr, “Magnetorheological Fluid Dampers: Scalability and Design Issue for Application to Dynamic Hazard Mitigation. in workshop on structural control. 1996,” *Hong Kong, China. AFP*, vol. 53.
- [64] H. Fujitani, Y. Shiozaki, T. Hiwatashi, K. Hata, T. Tomura, H. Sodeyama, and S. Soda, “A research and development of smart building structures by magneto-rheological damper,” in *Adv. Build. Technol.* Elsevier, 2002, pp. 473–480.
- [65] C. M. D. Wilson, “Fuzzy Control of Magnetorheological Dampers for Vibration Reduction of Seismically Excited Structures,” 2005.
- [66] R. C. Ehergott and S. F. Masri, “Modeling the oscillatory dynamic behaviour of electrorheological materials in shear,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 1, no. 4, p. 275, 1992.
- [67] C.-C. Chang and P. Roschke, “Neural network modeling of a magnetorheological damper,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 9, no. 9, pp. 755–764, 1998.
- [68] D.-H. Wang and W.-H. Liao, “Neural network modeling and controllers for magnetorheological fluid dampers,” in *10th IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst. No. 01CH37297*, vol. 3. IEEE, 2001, pp. 1323–1326.
- [69] X. Song, M. Ahmadian, and S. C. Southward, “Modeling magnetorheological dampers with application of nonparametric approach,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 16, no. 5, pp. 421–432, 2005.
- [70] R. Stanway, J. L. Sproston, and N. G. Stevens, “Non-linear identification of an electro-rheological vibration damper,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 18, no. 5, pp. 195–200, 1985.
- [71] ———, “Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper,” *J. Electrost.*, vol. 20, no. 2, pp. 167–184, 1987.
- [72] B. F. Spencer and M. K. Sain, “Controlling buildings: a new frontier in feedback,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 17, no. 6, pp. 19–35, 1997.

- [73] D. R. Gamota and F. E. Filisko, "Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: Moderate frequencies," *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 35, no. 3, pp. 399–425, 1991.
- [74] J. S. BF, S. J. Dyke, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Phenomenological model of a magnetorheological damper," *J. Eng. Mech.*, vol. 123, no. 3, pp. 230–238, 1997.
- [75] A. M. Halabian, M. M. Zafarani, M. S. Soheilipour, and S. Behbahani, "Optimal semi-active control of seismically excited MR-equipped nonlinear buildings using FLC and multi-objective NSGAI algorithms considering ground excitations," *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 6, no. 3, pp. 561–586, 2016.
- [76] J. N. Yang, S. Lin, and F. Jabbari, "H₂-based control strategies for civil engineering structures," *J. Struct. Control*, vol. 10, no. 3-4, pp. 205–230, 2003.
- [77] S. J. Dyke, B. F. Spencer, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart Mater. Struct.*, vol. 5, no. 5, pp. 565–575, 1996. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/5/5/006>
- [78] W. L. Brogan, "Modern control theory," 1991.
- [79] Z. Ying, Y.-Q. Ni, and J. M. Ko, "Nonclipping optimal control of randomly excited nonlinear systems using semi-active ER/MR dampers," in *Smart Struct. Mater. 2002 Smart Syst. Bridg. Struct. Highw.*, vol. 4696. International Society for Optics and Photonics, 2002, pp. 209–218.
- [80] J. N. Yang, J. C. Wu, and A. K. Agrawal, "Sliding mode control for seismically excited linear structures," *J. Eng. Mech.*, vol. 121, no. 12, pp. 1386–1390, 1995.
- [81] J. Zhang and P. N. Roschke, "Active control of a tall structure excited by wind," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 83, no. 1-3, pp. 209–223, 1999.
- [82] D. Dubois and H. Prade, "Operations on fuzzy numbers," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 9, no. 6, pp. 613–626, 1978.
- [83] M. Mizumoto and K. Tanaka, "Fuzzy sets and type 2 under algebraic product and algebraic sum," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 277–290, 1981.
- [84] A. Norwich and I. B. Turksen, "A model for the measurement of membership and the consequences of its empirical implementation," *Fuzzy sets Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–25, 1984.

- [85] M.-G. Chun, K.-C. Kwak, and J.-W. Ryu, "Application of ANFIS for coagulant dosing process in a water purification plant," in *FUZZ-IEEE'99. 1999 IEEE Int. Fuzzy Syst. Conf. Proc. (Cat. No. 99CH36315)*, vol. 3. IEEE, 1999, pp. 1743–1748.
- [86] S. Yasunobu and T. Hasegawa, "Evaluation of an automatic container crane operation system based on predictive fuzzy control," *Control Theory Adv. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 419–432, 1986.
- [87] J. A. Bernard, "Use of a rule-based system for process control," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 8, no. 5, pp. 3–13, 1988.
- [88] R. Guclu and H. Yazici, "Fuzzy logic control of a non-linear structural system against earthquake induced vibration," *J. Vib. Control*, vol. 13, no. 11, pp. 1535–1551, 2007.
- [89] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, no. 2, pp. 404–418, 1990.
- [90] M. Gen and R. Cheng, *Genetic algorithms and engineering optimization*. John Wiley & Sons, 1999, vol. 7.
- [91] K. Mittal, A. Jain, K. S. Vaisla, O. Castillo, and J. Kacprzyk, "A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 95, no. August, p. 103916, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103916>
- [92] J. M. Mendel, "Uncertainty, fuzzy logic, and signal processing," *Signal Processing*, vol. 80, no. 6, pp. 913–933, 2000. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168400000116>
- [93] O. Castillo, P. Melin, J. Kacprzyk, and W. Pedrycz, "Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications," in *2007 IEEE Int. Conf. Granul. Comput. (GRC 2007)*, 2007, p. 145.
- [94] MathWorks, "Foundations of Fuzzy Logic," 2021. [Online]. Available: <https://ww2.mathworks.cn/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html>
- [95] J. Harris, *Fuzzy logic applications in engineering science*. Springer Science & Business Media, 2005, vol. 29.
- [96] G. J. Klir and B. Yuan, "Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications," *Possibility Theory versus Probab. Theory*, vol. 32, no. 2, pp. 207–208, 1996.
- [97] G. Chen, T. T. Pham, and N. M. Boustany, "Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 54, no. 6, pp. B102—B103, 2001.

- [98] Y. Liu, F. Gordaninejad, C. A. Evrensel, and G. H. Hitchcock, "Experimental study on fuzzy logic vibration control of a bridge using fail-safe magnetorheological fluid dampers," in *Proc.SPIE*, vol. 4330, jul 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.434135>
- [99] L. A. Lara-Valencia, Y. Valencia-Gonzalez, and J. L. V. De Brito, "Use of fuzzy logic for the administration of a structural control system based on magnetorheological dampers," *Rev. Fac. Ing.*, vol. 1, no. 74, pp. 151–164, 2015.
- [100] H.-J. Jung, B. F. Spencer, and I.-W. Lee, "Control of Seismically Excited Cable-Stayed Bridge Employing Magnetorheological Fluid Dampers," *J. Struct. Eng.*, vol. 129, no. 7, pp. 873–883, 2003.
- [101] B. L. Zhang, Q. L. Han, and X. M. Zhang, "Recent advances in vibration control of offshore platforms," *Nonlinear Dyn.*, vol. 89, no. 2, pp. 755–771, 2017.
- [102] M. Salari and E. Spacone, "Analysis of Steel-Concrete Composite Frames with Bond-Slip Steel-Concrete Composite Frames," *J. Struct. Eng.*, vol. 9445, no. November, 2001.
- [103] S. Pourzeynali and M. Zarif, "Multi-objective optimization of seismically isolated high-rise building structures using genetic algorithms," *J. Sound Vib.*, vol. 311, no. 3, pp. 1141–1160, 2008. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X07008085>
- [104] J. D. Schaffer, "Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms," in *Proc. first Int. Conf. Genet. algorithms their Appl. 1985*. Lawrence Erlbaum Associates. Inc., Publishers, 1985.
- [105] D. E. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison," *Reading*, 1989.
- [106] C. M. Fonseca and P. J. Fleming, "Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization," *Proc. 5th Int. Conf. Genet. Algorithms*, vol. 1, no. October, pp. 416–423, 1993. [Online]. Available: http://pdf.aminer.org/000/310/607/genetic_{-}algorithms_{-}for_{-}multiobjective_{-}optimization_{-}formulationdiscussion_{-}and_{-}generalization.pdf
- [107] E. Bonabeau, D. d. R. D. F. Marco, M. Dorigo, G. Théraulaz, G. Theraulaz, and Others, *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford university press, 1999, no. 1.
- [108] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, "A review on genetic algorithm: past, present, and future," *Multimed. Tools Appl.*, pp. 1–36, 2020.

- [109] M. Mitchell, S. Fe, and S. Forrest, “Artificial Life 1 Introduction 2 Overview of Genetic Algorithms,” *Optimization*, pp. 1–28, 1993.
- [110] G. E. Box, “Evolutionary operation: A method for increasing industrial productivity,” *Evol. Comput. Foss. Rec.*, vol. 6, no. 2, pp. 121–141, 1998.
- [111] W. W. Bledsoe, “The use of biological concepts in the analytical study of systems,” in *ORSA-TIMS Natl. Meet.*, 1961.
- [112] H. J. Bremermann and Others, “Optimization through evolution and recombination,” *Self-organizing Syst.*, vol. 93, p. 106, 1962.
- [113] L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J. Walsh, “Artificial intelligence through simulated evolution,” 1966.
- [114] J. H. Holland and Others, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.
- [115] H. Chen, R. Ooka, and S. Kato, “Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 1, pp. 18–30, 2008.
- [116] A. Ghaheri, S. Shoar, M. Naderan, and S. S. Hoseini, “The applications of genetic algorithms in medicine,” *Oman Med. J.*, vol. 30, no. 6, p. 406, 2015.
- [117] C. W. Padgett and A. Saad, “Genetic algorithms in chemistry: Success or failure is in the genes,” in *Appl. Soft Comput.* Springer, 2009, pp. 181–189.
- [118] Z. Michalewicz, *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [119] D. Liu, “Mathematical modeling analysis of genetic algorithms under schema theorem,” *J. Comput. Methods Sci. Eng.*, vol. 19, no. S1, pp. S131–S137, 2019.
- [120] J. Nicklow, P. Reed, D. Savic, T. Dessalegne, L. Harrell, A. Chan-hilton, M. Karamouz, B. Minsker, A. Ostfeld, A. Singh, and E. Zechman, “State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water,” *J. Water Resour. Plann. Manag.*, vol. 136, no. August, pp. 412–432, 2010.
- [121] S. Kobayashi, “Foundations of genetic algorithms and its applications,” *Commun. ORSJ*, vol. 45, pp. 256–261, 1993.
- [122] R. Cheng, M. Gen, and Y. Tsujimura, “A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms—I. Representation,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 30, no. 4, pp. 983–997, 1996.

-
- [123] I. Rechenberg, “Evolutionsstrategien,” in *Simulationsmethoden der Medizin und Biol.* Springer, 1978, pp. 83–114.
- [124] R. A. Caruana, L. J. Eshelman, and J. D. Schaffer, “Representation and hidden bias II: Eliminating defining length bias in genetic search via shuffle crossover,” in *Proc. 11th Int. Jt. Conf. Artif. Intell. 1*, 1989, pp. 750–755.
- [125] L. T. Leng, “Guided genetic algorithm,” *Univ. Essex, A thesis Submitt. degree Ph. D Comput. Sci. Dep. Comput. Sci.*, 1999.
- [126] S. N. Sivanandam and S. N. Deepa, “Genetic algorithms,” in *Introd. to Genet. algorithms*. Springer, 2008, pp. 15–37.
- [127] B. R. Fox and M. B. McMahon, “Genetic operators for sequencing problems,” in *Found. Genet. algorithms*. Elsevier, 1991, vol. 1, pp. 284–300.
- [128] S. Jiang, K.-S. Chin, L. Wang, G. Qu, and K. L. Tsui, “Modified genetic algorithm-based feature selection combined with pre-trained deep neural network for demand forecasting in outpatient department,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 82, pp. 216–230, 2017.
- [129] K. Jebari and M. Madiafi, “Selection methods for genetic algorithms,” *Int. J. Emerg. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 333–344, 2013.
- [130] L. Araujo and C. Cervigón, *Algoritmos evolutivos: un enfoque práctico*. Ra-Ma, 2009.
- [131] C.-Y. Lee, “Entropy-Boltzmann selection in the genetic algorithms,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part B*, vol. 33, no. 1, pp. 138–149, 2003.
- [132] A. Hussain, Y. S. Muhammad, M. Nauman Sajid, I. Hussain, A. Mohamd Shoukry, and S. Gani, “Genetic algorithm for traveling salesman problem with modified cycle crossover operator,” *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2017, 2017.
- [133] D. A. Van Veldhuizen and G. B. Lamont, “Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art,” *Evol. Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 125–147, 2000.
- [134] M. T. Emmerich and A. H. Deutz, “A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods,” *Nat. Comput.*, vol. 17, no. 3, pp. 585–609, 2018.
- [135] C. A. C. Coello, “A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques,” *Knowl. Inf. Syst.*, vol. 1, no. 3, pp. 269–308, 1999.
- [136] F. Kursawe, “A variant of evolution strategies for vector optimization,” in *Int. Conf. Parallel Probl. Solving from Nat.* Springer, 1990, pp. 193–197.

- [137] C. M. Fonseca, P. J. Fleming, and Others, “Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization.” in *Icga*, vol. 93, no. July. Citeseer, 1993, pp. 416–423.
- [138] M. Akbari, P. Asadi, M. K. B. Givi, and G. Khodabandehlouie, *Artificial neural network and optimization*, 2014.
- [139] J. B. Kollat and P. M. Reed, “Comparing state-of-the-art evolutionary multi-objective algorithms for long-term groundwater monitoring design,” *Adv. Water Resour.*, vol. 29, no. 6, pp. 792–807, 2006.
- [140] C. Peñuela and M. Granada Echeverri, “Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (nsga-ii).” *Sci. Tech.*, vol. 3, no. 35, pp. 175–180, 2007.
- [141] The Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD), “Strong-Motion Data Set.” [Online]. Available: <https://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/archive.pl>
- [142] D. A. Caicedo, “A comparative analysis on the seismic behavior of buildings using inerter-based devices: Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) and Tuned Inerter Damper (TID).” 2020.
- [143] Y. P. Wang, W. H. Liao, and C. L. Lee, “A state-space approach for dynamic analysis of sliding structures,” *Eng. Struct.*, vol. 23, no. 7, pp. 790–801, 2001.
- [144] A. K. Chopra, “Dinámica de estructuras,” *México*, 2014.
- [145] P. Paultre, *Dynamics of structures*. John Wiley & Sons, 2013.
- [146] F. Y. Cheng, *Matrix analysis of structural dynamics: applications and earthquake engineering*. CRC Press, 2017, vol. 1.
- [147] S. M. Zahrai and H. Salehi, “Semi-active seismic control of mid-rise structures using magneto-rheological dampers and two proposed improving mechanisms,” *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.*, vol. 38, no. C1, pp. 21–36, 2014.