

# Índice

<b>Acrónimos</b>	<b>4</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>6</b>
1.1 Estado del Arte . . . . .	7
1.2 Marco teórico . . . . .	8
1.2.1 Tipos de máquinas eléctricas usadas en EV . . . . .	8
1.2.2 Métodos de control para máquinas eléctricas . . . . .	8
1.2.3 Tipos de control predictivo . . . . .	8
1.2.4 Control predictivo de estados finitos FCS-MPC . . . . .	9
1.2.5 Control predictivo de horizonte lejano LH-MPC . . . . .	9
1.3 Objetivos . . . . .	10
1.3.1 Objetivo General . . . . .	10
1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .	10
1.4 Alcances y Limitaciones . . . . .	11
1.4.1 Alcances . . . . .	11
1.4.2 Limitaciones . . . . .	11
1.5 Metodología . . . . .	12
1.5.1 Revisión bibliográfica . . . . .	12
1.5.2 Simulación FOC, FS-MPC y LH-MPC . . . . .	12
1.5.3 Validación de resultados experimentales . . . . .	12
1.6 Resumen de capítulos . . . . .	12
<b>2 Modelamiento de máquinas eléctricas</b>	<b>13</b>
2.0.1 Ecuaciones de voltaje . . . . .	13
2.0.2 Ecuaciones de corriente . . . . .	14
2.0.3 Plano de referencia estacionario . . . . .	14
2.0.4 Plano de referencia rotacional . . . . .	15
2.0.5 Ecuaciones mecánicas . . . . .	16
<b>3 Simulación control por campo orientado</b>	<b>18</b>
3.1 Diseño de controladores PI para FOC . . . . .	19
3.1.1 Controlador Continuo . . . . .	20
3.1.2 Controlador PI de lazo mecánico . . . . .	21
3.1.3 Controlador PI de lazo eléctrico . . . . .	22
3.2 Discretización del controlador PI . . . . .	22
3.3 Controlador discreto con Anti Wind-Up . . . . .	24
3.4 Resultados de simulación FOC . . . . .	25
3.4.1 Respuesta dinámica . . . . .	26
3.4.2 Estado estacionario . . . . .	27
3.4.3 Distorsión armónica total . . . . .	28
<b>4 Simulación control predictivo de estados finitos</b>	<b>29</b>
4.1 Modelo predictivo . . . . .	30
4.2 Discretización del modelo . . . . .	30
4.3 Función de costo . . . . .	31
4.4 Resultados de simulación MPC . . . . .	32
4.4.1 Respuesta dinámica . . . . .	33
4.4.2 Estado estacionario . . . . .	34
4.4.3 Distorsión armónica total versus frecuencia de conmutación promedio . . . . .	35
<b>5 Simulación control predictivo de horizonte lejano</b>	<b>36</b>
5.1 Extrapolación de señales . . . . .	36
5.2 Función de costo . . . . .	37
5.3 Resultados de simulación LH-MPC . . . . .	37

5.3.1	Respuesta dinámica . . . . .	38
5.3.2	Estado estacionario . . . . .	39
5.3.3	Distorsión armónica total . . . . .	40
5.4	Comparación de los tres métodos . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Validación experimental</b>	<b>42</b>
6.1	Implementación del banco de pruebas . . . . .	42
6.2	Configuración del protocolo de comunicación . . . . .	43
6.3	Obtención de datos y resultados experimentales . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Conclusión</b>	<b>49</b>
	<b>Anexos</b>	<b>65</b>
	<b>Referencias</b>	<b>65</b>

## Índice de figuras

1.2.3.1	Clasificación de tipos de control predictivo usados en electrónica de potencia. . . . .	9
1.3.0.1	Diagrama de bloques del FCS-MPC para un inversor de voltaje. . . . .	10
2.0.0.1	Circuito equivalente de un bobinado en la máquina eléctrica. . . . .	13
2.0.3.1	Representación vectorial del plano $\alpha - \beta$ proyectado sobre el plano $abc$ de corrientes de fase. . . . .	14
2.0.4.1	Representación vectorial del plano $d - q$ proyectado sobre el plano $\alpha - \beta$ . . . . .	15
3.0.0.1	Diagrama de bloques de control por campo orientado. . . . .	18
3.3.0.1	Diagrama de bloques del controlador con Anti Wind-Up. . . . .	24
3.4.1.1	Resultados de respuesta dinámica de control por campo orientado. . . . .	26
3.4.2.1	Comportamiento en estado estacionario de control por campo orientado. . . . .	27
3.4.3.1	Resultados de respuesta dinámica de control por campo orientado. . . . .	28
4.0.0.1	Diagrama de control predictivo. . . . .	29
4.0.0.2	topología de un convertidor trifásico de dos niveles. . . . .	30
4.4.1.1	Resultados de respuesta dinámica de control predictivo de estados finitos. . . . .	33
4.4.2.1	Comportamiento durante estado estacionario de control predictivo de estados finitos. . . . .	34
4.4.3.1	Comparación de frecuencia de conmutación ante distintos valores de peso $W$ en control predictivo de estados finitos. . . . .	35
5.3.1.1	Resultados de respuesta dinámica de control predictivo de horizonte lejano. . . . .	38
5.3.2.1	Comportamiento durante estado estacionario de control predictivo de horizonte lejano. . . . .	39
5.3.3.1	Comparación de frecuencia de conmutación ante distintos valores de peso $W$ en control predictivo de horizonte lejano. . . . .	40
5.4.0.1	Comparación de THD entre los tres métodos de control propuestos. . . . .	41
6.1.0.1	Tarjeta de desarrollo de la marca Texas Instruments modelo LAUNCHXL-F28379D . . . . .	42
6.1.0.2	Inversor de dos niveles de la marca Texas Instruments modelo BOOSTXL-3PHGanInv . . . . .	42
6.1.0.3	PMSM de la marca Teknic modelo M-3210P-LN-04K . . . . .	42
6.1.0.4	Setup experimental. Zona 1 (en amarillo): Motores acoplados y tacómetro laser. Zona 2 (en celeste): par de inversores con sensores de corriente. Zona 3 (en rojo): Computador host recibiendo datos del launchpad. . . . .	43
6.2.0.1	Ventana de configuración de hardware, en rojo, la sección de tasa de transferencia de datos. . . . .	44
6.2.0.2	Interfaz de control para el banco de pruebas . . . . .	44
6.3.0.1	Osciloscopio digital Rigol, mostrando la corriente del motor controlado en celeste y la corriente del motor de carga en amarillo. . . . .	45
6.3.0.2	Corrientes de fase del motor controlado mediante MPC, con diferentes tiempos de muestreo. . . . .	46
6.3.0.3	Corrientes de fase del motor controlado mediante FOC, con diferentes tiempos de muestreo. . . . .	47
6.3.0.4	Espectro armónico de la corriente con MPC a $40\mu s$ . . . . .	48
6.3.0.5	Espectro armónico de la corriente con FOC a $40\mu s$ . . . . .	48
7.0.0.1	Captura de pantalla del osciloscopio digital Rigol, mostrando la corriente del motor controlado por MPC. Colores invertidos para mejor claridad. . . . .	50