

# Tabla de Contenido

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación y Antecedentes . . . . .                           | 1         |
| 1.2. Objetivos . . . . .   | 4         |
| 1.2.1. Objetivo General . . . . .                                  | 4         |
| 1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .                             | 4         |
| 1.3. Alcances del trabajo . . . . .                                | 5         |
| 1.4. Limitaciones . . . . .  | 5         |
| <b>2. Marco Teórico</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1. Métodos Numéricos . . . . .                                   | 6         |
| 2.1.1. Análisis de Fourier . . . . .                               | 6         |
| 2.1.2. Transformada de Laplace . . . . .                           | 7         |
| 2.1.3. Transformada de Clarke . . . . .                            | 7         |
| 2.1.4. Métodos de Discretización . . . . .                         | 7         |
| 2.1.4.1. Método de Euler . . . . .                                 | 8         |
| 2.1.4.2. Método de Tustin . . . . .                                | 8         |
| 2.1.5. Modelo en Variables de Estado . . . . .                     | 8         |
| 2.2. Convertidores de Potencia . . . . .                           | 9         |
| 2.2.1. Convertidores con Elemento Almacenador de Energía . . . . . | 10        |
| 2.2.2. Convertidores sin Elemento Almacenador de Energía . . . . . | 11        |
| 2.2.2.1. Convertidor Matricial Directo . . . . .                   | 11        |
| 2.2.2.2. Convertidor Matricial Indirecto . . . . .                 | 11        |
| 2.3. Motores de Inducción . . . . .                                | 15        |
| 2.4. Control PI . . . . .  | 16        |
| 2.4.1. <i>Antiwindup</i> . . . . .                                 | 17        |
| 2.5. Técnicas de Control Predictivo . . . . .                      | 17        |
| 2.5.1. Control Predictivo Operando a Frecuencia Variable . . . . . | 17        |
| 2.5.2. Control Predictivo Operando a Frecuencia Fija . . . . .     | 18        |
| 2.5.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                     | 19        |
| <b>3. Metodología Propuesta</b>                                    | <b>20</b> |
| 3.1. Metodología general de trabajo . . . . .                      | 20        |
| 3.1.1. Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .          | 26        |
| 3.1.2. Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .              | 26        |
| 3.1.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                     | 26        |
| 3.1.4. Rediseño de parámetros de filtro y control PI . . . . .     | 27        |
| 3.1.5. Métricas de Comparación . . . . .                           | 27        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. Caso de Estudio</b>  | <b>29</b> |
| 4.1. Parámetros de Red . . . . .   | 29        |
| 4.2. Parámetros de Motores . . . . .   | 30        |
| 4.3. Diseño de Elementos . . . . .   | 30        |
| 4.3.1. Diseño de Controlador PI . . . . .  | 30        |
| 4.3.2. Diseño de Filtro de Armónicos . . . . .                                     | 31        |
| 4.4. Parámetros de Control Predictivo . . . . .                                    | 31        |
| 4.4.1. Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .                          | 31        |
| 4.4.2. Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                              | 32        |
| 4.4.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                                     | 32        |
| 4.5. Condiciones de Operación . . . . .  | 33        |
| 4.5.1. Cambio de referencia de velocidad: 0 a $W_n$ , sin carga mecánica . . . . . | 34        |
| 4.5.2. Operación a $W_n$ , con carga mecánica . . . . .                            | 34        |
| 4.5.3. Cambio de referencia de $W_n$ a $-W_n$ . . . . .                            | 34        |
| 4.5.4. Operación a $-W_n$ , con carga mecánica . . . . .                           | 35        |
| <br>   |           |
| <b>5. Resultados</b>   | <b>36</b> |
| 5.1. Seguimiento de Torque y Velocidad . . . . .                                   | 36        |
| 5.1.1. Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .                          | 36        |
| 5.1.2. Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                              | 37        |
| 5.1.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                                     | 38        |
| 5.1.4. Discusión de Seguimiento de Torque y Velocidad . . . . .                    | 39        |
| 5.2. Comportamiento del DC-Link . . . . .  | 40        |
| 5.2.1. Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .                          | 40        |
| 5.2.2. Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                              | 41        |
| 5.2.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                                     | 41        |
| 5.2.4. Discusión de variables del DC-Link . . . . .                                | 42        |
| 5.3. Comportamiento de variables en la entrada del convertidor . . . . .           | 42        |
| 5.3.1. Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .                          | 42        |
| 5.3.2. Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                              | 43        |
| 5.3.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                                     | 43        |
| 5.3.4. Discusión de variables en la entrada del convertidor . . . . .              | 44        |
| 5.4. Cambio de referencia de 0 a $W_n$ , sin carga mecánica . . . . .              | 44        |
| 5.4.1. Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .                          | 44        |
| 5.4.2. Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                              | 45        |
| 5.4.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                                     | 45        |
| 5.4.4. Cambio de velocidad, de 0 a $W_n$ . . . . .                                 | 46        |
| 5.5. Operación a $W_n$ , con carga mecánica . . . . .                              | 46        |
| 5.5.1. Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .                          | 46        |
| 5.5.2. Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                              | 47        |
| 5.5.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                                     | 47        |
| 5.5.4. Cambio de carga mecánica a 40 Nm. . . . .                                   | 48        |
| 5.6. Cambio de referencia de $W_n$ a $-W_n$ . . . . .                              | 48        |
| 5.6.1. Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .                          | 48        |
| 5.6.2. Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                              | 49        |
| 5.6.3. Control Predictivo Secuencial . . . . .                                     | 49        |
| 5.6.4. Inversión de marcha . . . . .   | 50        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.7.      | Comportamiento del Filtro durante Inversión de Marcha . . . . . | 50        |
| 5.7.1.    | Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .              | 50        |
| 5.7.2.    | Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                  | 51        |
| 5.7.3.    | Control Predictivo Secuencial . . . . .                         | 51        |
| 5.7.4.    | Comportamiento del filtro durante inversión de marcha . . . . . | 52        |
| 5.8.      | Operación a $-W_n$ , con carga mecánica . . . . .               | 52        |
| 5.8.1.    | Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .              | 53        |
| 5.8.2.    | Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                  | 53        |
| 5.8.3.    | Control Predictivo Secuencial . . . . .                         | 54        |
| 5.8.4.    | Cambio de carga mecánica a 55 Nm . . . . .                      | 54        |
| 5.9.      | Espectro de frecuencia . . . . .                                | 54        |
| 5.9.1.    | Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .              | 55        |
| 5.9.1.1.  | Corriente de entrada $i_s$ . . . . .                            | 55        |
| 5.9.1.2.  | Corriente de carga $i_o$ . . . . .                              | 56        |
| 5.9.2.    | Discusión Control Predictivo a Frecuencia Variable . . . . .    | 56        |
| 5.9.3.    | Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .                  | 57        |
| 5.9.3.1.  | Corriente de entrada $i_s$ . . . . .                            | 57        |
| 5.9.3.2.  | Corriente de carga $i_o$ . . . . .                              | 58        |
| 5.9.4.    | Discusión Control Predictivo a Frecuencia Fija . . . . .        | 58        |
| 5.9.5.    | Control Predictivo Secuencial . . . . .                         | 59        |
| 5.9.5.1.  | Corriente de entrada $i_s$ . . . . .                            | 59        |
| 5.9.5.2.  | Corriente de carga $i_o$ . . . . .                              | 60        |
| 5.9.6.    | Discusión Control Predictivo Secuencial . . . . .               | 60        |
| 5.9.7.    | Discusión General del Espectro de Frecuencia . . . . .          | 61        |
| 5.10.     | Carga Computacional . . . . .                                   | 62        |
| 5.11.     | Resumen de resultados . . . . .                                 | 64        |
| <b>6.</b> | <b>Conclusiones</b> . . . . .                                   | <b>65</b> |
| 6.1.      | Conclusiones . . . . .  | 65        |
| 6.2.      | Aportes Realizados . . . . .                                    | 66        |
| 6.3.      | Trabajo Futuro . . . . .  | 67        |
|           | <b>Bibliografía</b> . . . . .                                   | <b>68</b> |