

Escuela Técnica Superior de Ingenieros



Ingeniería Industrial (Electrónica Industrial)

Departamento de Tecnología Electrónica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO  
DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO  
EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES  
PARA SU INTEGRACIÓN EN  
MICROREDES ELÉCTRICAS**

AUTOR: ISAAC GIL MERA

TUTOR: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

Sevilla, noviembre de 2009



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO  
BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU  
INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS**

**AUTOR: Isaac Gil Mera**

**TUTOR: Sergio Vázquez Pérez**

## Agradecimientos

---

A mis padres, por haber estado a mi lado. A mi novia por su interés y entretenimiento. A todos mis compañeros de trabajo del laboratorio de electrónica de potencia, por estar siempre dispuestos a ayudar. Y en especial, a mi tutor, por haber dirigido este proyecto a pesar de las adversidades.



|                                                                                   |                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO<br/>BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU<br/>INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS</b> |
|                                                                                   | <b>AUTOR: Isaac Gil Mera</b>                                                                                                                                  |
|                                                                                   | <b>TUTOR: Sergio Vázquez Pérez</b>                                                                                                                            |

---



---

## ÍNDICE

---



---

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÍNDICE.....</b>                                       | <b>3</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>                     | <b>7</b>  |
| <b>1. MICROREDES Y FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE.....</b> | <b>8</b>  |
| <b>2. NECESIDAD DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO .....</b>               | <b>12</b> |
| <b>4. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....</b>                   | <b>17</b> |
| <b>5. REFERENCIAS.....</b>                               | <b>18</b> |
| <b>CAPÍTULO 2. BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES.....</b>    | <b>20</b> |
| <b>1. SISTEMAS BASADOS EN BATERÍAS .....</b>             | <b>21</b> |
| 1.1. Resumen de características principales .....        | 23        |
| 1.2. Principales fabricantes .....                       | 24        |
| 1.3. Futuras tendencias.....                             | 24        |
| <b>2. SISTEMAS BASADOS EN SUPERCONDENSADORES .....</b>   | <b>25</b> |
| 2.1. Resumen de características principales .....        | 27        |
| 2.2. Principales fabricantes .....                       | 27        |
| 2.3. Futuras tendencias.....                             | 28        |
| <b>3. REFERENCIAS.....</b>                               | <b>30</b> |

|                                                                                   |                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO<br/>BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU<br/>INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS</b> |
|                                                                                   | <b>AUTOR: Isaac Gil Mera</b>                                                                                                                                  |
|                                                                                   | <b>TUTOR: Sergio Vázquez Pérez</b>                                                                                                                            |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 3. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO .....</b>                   | <b>32</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>                                                  | <b>33</b> |
| <b>2. GESTIÓN DE LA ENERGÍA.....</b>                                         | <b>35</b> |
| <b>3. SITUACIÓN DE DISEÑO .....</b>                                          | <b>39</b> |
| 3.1. Especificaciones de diseño.....                                         | 41        |
| 3.2. Escenarios de funcionamiento.....                                       | 42        |
| <b>4. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO.....</b>                | <b>43</b> |
| 4.1. Sistema de Supercondensadores.....                                      | 44        |
| 4.2. Sistema de Baterías.....                                                | 47        |
| <b>CAPÍTULO 4. SIMULACIONES DEL SISTEMA.....</b>                             | <b>49</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>                                                  | <b>50</b> |
| <b>2. ENTORNO DE SIMULACIÓN.....</b>                                         | <b>52</b> |
| <b>3. ALGORITMOS DE CONTROL .....</b>                                        | <b>57</b> |
| <b>4. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....</b>                                      | <b>59</b> |
| <b>5. RESULTADO DE SIMULACIONES .....</b>                                    | <b>60</b> |
| 5.1. Escenario I. Potencia generada no nula y potencia demandada nula .....  | 61        |
| 5.2. Escenario II. Potencia generada nula y potencia demandada no nula ..... | 64        |
| 5.3. Escenario III. Potencia generada mayor que potencia demandada.....      | 66        |
| 5.4. Escenario IV. Potencia demandada mayor que potencia generada .....      | 68        |

|                                                                                   |                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO<br/>BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU<br/>INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS</b> |
|                                                                                   | <b>AUTOR: Isaac Gil Mera</b>                                                                                                                                  |
|                                                                                   | <b>TUTOR: Sergio Vázquez Pérez</b>                                                                                                                            |

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CAPÍTULO 5. ELECTRÓNICA DE POTENCIA .....</b>                           | <b>70</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>                                                | <b>71</b>  |
| <b>2. TECNOLOGÍA “INTERLEAVING” .....</b>                                  | <b>73</b>  |
| <b>3. TOPOLOGÍA Y ESPECIFICACIONES DE DISEÑO .....</b>                     | <b>75</b>  |
| 3.1. Sistema de Supercondensadores.....                                    | 76         |
| 3.2. Sistema de Baterías.....                                              | 77         |
| <b>4. DISEÑO DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA PARA SUPERCONDENSADORES .....</b> | <b>78</b>  |
| 4.1. Transistores de potencia.....                                         | 81         |
| 4.2. Controladores de disparo .....                                        | 83         |
| 4.3. Disipación térmica y refrigeración .....                              | 85         |
| 4.4. Inductancias de rama.....                                             | 88         |
| 4.5. Banco de condensadores de entrada .....                               | 94         |
| 4.6. Filtro snubber.....                                                   | 98         |
| 4.7. Resistencias de precarga.....                                         | 100        |
| 4.8. Resistencias de descarga .....                                        | 104        |
| 4.9. Aparamenta eléctrica de protección .....                              | 107        |
| 4.10. Aparamenta eléctrica de maniobra .....                               | 109        |
| 4.11. Sistema de cableado .....                                            | 111        |
| <b>5. DISEÑO DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA PARA BATERÍAS .....</b>           | <b>113</b> |
| 5.1. Transistores de potencia.....                                         | 115        |
| 5.2. Controladores de disparo .....                                        | 116        |
| 5.3. Disipación térmica y refrigeración .....                              | 117        |
| 5.4. Inductancias de rama.....                                             | 119        |
| 5.5. Banco de condensadores de entrada .....                               | 123        |
| 5.6. Filtro snubber.....                                                   | 125        |
| 5.7. Resistencias de precarga.....                                         | 126        |
| 5.8. Aparamenta eléctrica de protección .....                              | 127        |
| 5.9. Aparamenta eléctrica de maniobra .....                                | 129        |
| 5.10. Sistema de cableado .....                                            | 130        |
| <b>6. REFERENCIAS.....</b>                                                 | <b>132</b> |

|                                                                                   |                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO<br/>BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU<br/>INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS</b> |
|                                                                                   | <b>AUTOR: Isaac Gil Mera</b>                                                                                                                                  |
|                                                                                   | <b>TUTOR: Sergio Vázquez Pérez</b>                                                                                                                            |

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CAPÍTULO 6. ELECTRÓNICA DE CONTROL .....</b>                         | <b>134</b> |
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                                    | 135        |
| 2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO .....                                     | 136        |
| 3. ESQUEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL.....                                  | 138        |
| 4. DISEÑO DEL HARDWARE DE CONTROL .....                                 | 139        |
| 4.1. Núcleo de procesamiento basado en DSP .....                        | 140        |
| 4.2. Adquisición de parámetros eléctricos: tensiones y corrientes ..... | 146        |
| 4.3. Bus de comunicación con controladores de disparo .....             | 152        |
| 4.4. Bus de comunicación paralelo de expansión .....                    | 155        |
| 4.5. Bus de comunicación serie SCI.....                                 | 156        |
| 4.6. Sistema de emulación y depurado JTAG.....                          | 157        |
| 4.7. Actuadores sobre contactores de maniobra.....                      | 158        |
| 4.8. Fuente de alimentación .....                                       | 159        |
| 5. PLACA DE CIRCUITO IMPRESO .....                                      | 161        |
| 6. CONECTORES DE PCB .....                                              | 164        |
| 7. REFERENCIAS.....                                                     | 167        |
| <b>CAPÍTULO 7. ANEXOS .....</b>                                         | <b>168</b> |
| 1. SELECCIÓN DE DRIVERS CON DRIVERSEL <sup>TM</sup> .....               | 169        |
| 2. ESTUDIO TÉRMICO DE CONVERTIDOR BUCK .....                            | 170        |
| 3. ESTUDIO TÉRMICO DE CONVERTIDOR BOOST .....                           | 172        |
| 4. ESQUEMÁTICO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESO .....                       | 174        |
| 5. LAYOUT DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESO.....                             | 181        |