

# Dimensionado del sistema de accionamiento electromecánico de un vehículo eléctrico

---

Trabajo Final del Grado de Ingeniería  
Electrónica Industrial y Automática

**Autor: Fernando Haro Javaloyes**  
**Tutor: Vicente Benlloch Ramos**  
**3 de Julio del 2020**

- 1. Memoria**
- 2. Planos**
- 3. Pliego de condiciones**
- 4. Presupuesto**



# Resumen

---

El presente TFG consta de dos partes:

La primera, es de índole documental, donde se expone la tipología y el funcionamiento de los vehículos híbridos y eléctricos. En consecuencia, se detallan los componentes del tren de potencia y las características de este tipo de vehículos. Entre estos cabe destacar el protagonismo del motor, la batería, el inversor y convertidor, el cargador integrado y el sistema reductor.

La segunda parte tiene un carácter más técnico. Aquí se desarrollará el dimensionado del sistema de accionamiento electromecánico de un vehículo eléctrico. Para ello se seleccionará el motor homologado adecuado para corresponder a las prestaciones deseadas del vehículo y se realizará el análisis de par-potencia, de los parámetros del accionamiento y del punto estacionario escogido.

# Palabras Clave

---

Movilidad eléctrica, vehículo híbrido, vehículo eléctrico, accionamiento electromecánico.



# Índice General

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>RESUMEN</b>   | <b>1</b>   |
| <b>PALABRAS CLAVE</b>  | <b>1</b>   |
| <b>ÍNDICE GENERAL</b>  | <b>2</b>   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>   | <b>3</b>   |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>  | <b>6</b>   |
| <b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>   | <b>7</b>   |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>   | <b>12</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS</b>  | <b>13</b>  |
| <b>3. UN POCO DE HISTORIA</b>  | <b>14</b>  |
| <b>4. CONTEXTO Y EVOLUCIÓN DEL SECTOR</b>                                | <b>18</b>  |
| <b>5. COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS</b> | <b>19</b>  |
| <b>6. VEHÍCULOS HÍBRIDOS</b>   | <b>59</b>  |
| <b>7. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS</b>   | <b>66</b>  |
| <b>8. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO ELECTROMECAÁNICO</b> | <b>68</b>  |
| <b>9. CICLO DE CONDUCCIÓN</b>  | <b>85</b>  |
| <b>10. CÁLCULO DE SECCIONES</b>  | <b>106</b> |
| <b>11. CONCLUSIONES</b>  | <b>107</b> |
| <b>12. BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>109</b> |
| <b>13. PLIEGO DE CONDICIONES</b>   | <b>114</b> |
| <b>14. PRESUPUESTO</b>   | <b>129</b> |

# Índice de Figuras

---

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 3.1: COCHE ELÉCTRICO DE ROBERT ANDERSON  | 14 |
| FIGURA 3.2: LA JAMAIS CONTENTE, DE CAMILLE JENATZY  | 15 |
| FIGURA 3.3: ANUNCIO PUBLICITARIO DEL DETROIT ELECTRIC                                       | 15 |
| FIGURA 3.4: LÍNEA DE ENSAMBLAJE DE FORD   | 16 |
| FIGURA 3.5: EV-1 DE GENERAL MOTORS  | 16 |
| FIGURA 3.6: TESLA ROADSTER, DE 2008   | 17 |
| FIGURA 5.1: POSIBLES CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN EN LAS CELDAS DE UNA BATERÍA               | 21 |
| FIGURA 5.2: COMPONENTES BÁSICOS DE UNA CELDA RECARGABLE                                     | 21 |
| FIGURA 5.3: ESTRUCTURA DE UNA BATERÍA   | 23 |
| FIGURA 5.4: ORGANIZACIÓN DE LAS CELDAS DE LA BATERÍA DE UN NISSAN LEAF (VEHÍCULO ELÉCTRICO) | 25 |
| FIGURA 5.5: PARTES DE UNA BATERÍA PB-ÁCIDO  | 28 |
| FIGURA 5.6: BATERÍA DE NI-MH.   | 29 |
| FIGURA 5.7: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BATERÍA DE ION-LITIO                           | 31 |
| FIGURA 5.8: PROPIEDADES DE LAS BATERÍAS ION-LITIO SEGÚN MATERIAL DE ELECTRODOS              | 32 |
| FIGURA 5.9: CURVAS DE DESCARGA DE BATERÍAS LIPO A DISTINTAS TEMPERATURAS                    | 34 |
| FIGURA 5.10: EJEMPLO DE DISPOSICIÓN DEL DISPOSITIVO BMS                                     | 36 |
| FIGURA 5.11: MOVIMIENTO DE ROTACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS                                   | 39 |
| FIGURA 5.12: TIPOS DE ESTADORES   | 40 |
| FIGURA 5.13: TIPOS DE ROTORES   | 41 |
| FIGURA 5.14: COJINETE DE DESLIZAMIENTO  | 42 |
| FIGURA 5.15: COJINETE DE RODAMIENTO   | 42 |
| FIGURA 5.16: CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS  | 43 |
| FIGURA 5.17: COMPONENTES DE UN MOTOR DC BRUSHLESS   | 44 |
| FIGURA 5.18: ESQUEMA DE MOTOR CC EXCITACIÓN INDEPENDIENTE                                   | 45 |
| FIGURA 5.19: ESQUEMA DE MOTOR CC EXCITACIÓN EN SERIE  | 45 |
| FIGURA 5.20: ESQUEMA DE MOTOR CC EXCITACIÓN EN PARALELO                                     | 46 |
| FIGURA 5.21: ESQUEMA DE MOTOR CC EXCITACIÓN <i>COMPOUND</i>                                 | 46 |
| FIGURA 5.22: ROTOR DE JAULA DE ARDILLA  | 47 |
| FIGURA 5.23: ROTOR BOBINADO Y ESTATOR   | 48 |
| FIGURA 5.24: PARTES DE UN MOTOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES                              | 50 |
| FIGURA 5.25: MOTOR DE RELUCTANCIA VARIABLE  | 52 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>FIGURA 5.26: CONFIGURACIÓN TORUS Y DE ROTOR INTERIOR DE LOS MOTORES DE FLUJO AXIAL</b>     | <b>53</b> |
| <b>FIGURA 5.27: MOTOR DE FLUJO AXIAL IMPLEMENTADO EN UNA RUEDA DE VEHÍCULO ELÉCTRICO</b>      | <b>53</b> |
| <b>FIGURA 5.28: CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE RELACIÓN VOLTAJE - FRECUENCIA</b>               | <b>54</b> |
| <b>FIGURA 5.29: INVERSOR MARCA TOYOTA</b>   | <b>55</b> |
| <b>FIGURA 5.30: ESQUEMA DE PASO DE CORRIENTE ELÉCTRICO POR EL TREN DE POTENCIA</b>            | <b>56</b> |
| <b>FIGURA 5.31: TOMA DE RECARGA DE BATERÍA DE ALTA TENSIÓN EN UN VEHÍCULO</b>                 | <b>57</b> |
| <b>FIGURA 5.32: ESQUEMA DE LA TRANSMISIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO</b>                        | <b>58</b> |
| <b>FIGURA 6.1: LOGO DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS DE FORD</b>   | <b>59</b> |
| <b>FIGURA 6.2: GRADOS DE ELECTRIFICACIÓN DEL VEHÍCULO</b>                                     | <b>60</b> |
| <b>FIGURA 6.3: BOTÓN DE SISTEMA START &amp; STOP</b>  | <b>61</b> |
| <b>FIGURA 6.4: LOGO DE LOS VEHÍCULOS MILD HYBRID</b>  | <b>62</b> |
| <b>FIGURA 6.5: ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN EN PARALELO</b>                                       | <b>63</b> |
| <b>FIGURA 6.6: ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN SERIE-PARALELO</b>                                    | <b>63</b> |
| <b>FIGURA 6.7: PUERTO DE CARGA DE UN PHEV</b>   | <b>64</b> |
| <b>FIGURA 6.8: ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN EN SERIE</b>  | <b>65</b> |
| <b>FIGURA 7.1: IMAGEN REPRESENTATIVA DE IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO</b> | <b>66</b> |
| <b>FIGURA 8.1: FICHA TÉCNICA NISSAN LEAF PARTE 1</b>  | <b>69</b> |
| <b>FIGURA 8.2: FICHA TÉCNICA NISSAN LEAF PARTE 2</b>  | <b>69</b> |
| <b>FIGURA 8.3: TABLA DE SELECCIÓN DE MOTOR</b>  | <b>73</b> |
| <b>FIGURA 8.4: ESQUEMA DE ACOPLAMIENTO CARGA-MOTOR</b>  | <b>74</b> |
| <b>FIGURA 8.5: CURVA DE PAR-VELOCIDAD DE LA CARGA</b>   | <b>76</b> |
| <b>FIGURA 8.6: CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN</b>                    | <b>76</b> |
| <b>FIGURA 8.7: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR</b>  | <b>78</b> |
| <b>FIGURA 8.8: CURVA POTENCIA-VELOCIDAD</b>   | <b>79</b> |
| <b>FIGURA 8.9: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR Y LA CARGA</b>                                   | <b>80</b> |
| <b>FIGURA 8.10: PÉRDIDAS ENERGÉTICAS DE UN MOTOR</b>  | <b>82</b> |
| <b>FIGURA 9.1: CIRCUITO DE CONDUCCIÓN SELECCIONADO</b>  | <b>85</b> |
| <b>FIGURA 9.2: CURVA PAR-VELOCIDAD DE LA CARGA 1</b>  | <b>88</b> |
| <b>FIGURA 9.3: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR Y LA CARGA 1</b>                                 | <b>88</b> |
| <b>FIGURA 9.4: CURVA PAR-VELOCIDAD DE LA CARGA 2</b>  | <b>91</b> |
| <b>FIGURA 9.5: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR Y LA CARGA 2</b>                                 | <b>92</b> |
| <b>FIGURA 9.6: CURVA PAR-VELOCIDAD DE LA CARGA 3</b>  | <b>95</b> |
| <b>FIGURA 9.7: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR Y LA CARGA 3</b>                                 | <b>96</b> |



|  |            |
|--|------------|
| <b>FIGURA 9.8: CURVA PAR-VELOCIDAD DE LA CARGA 4</b>                   | <b>99</b>  |
| <b>FIGURA 9.9: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR Y LA CARGA 3</b>          | <b>99</b>  |
| <b>FIGURA 9.8: CURVA PAR-VELOCIDAD DE LA CARGA 5</b>                   | <b>102</b> |
| <b>FIGURA 9.9: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR Y LA CARGA 5</b>          | <b>103</b> |
| <b>FIGURA 10.1: TABLA B52.1 UNE 20460 SEÑALANDO CASO DE APLICACIÓN</b> | <b>107</b> |



# Índice de Tablas

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>TABLA 5.1: ENERGÍA ESPECÍFICA DE DISTINTAS FUENTES .....</b>  | <b>25</b>  |
| <b>TABLA 5.2: CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS PB-ÁCIDO .....</b> | <b>29</b>  |
| <b>TABLA 5.3: CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS NIMH .....</b>     | <b>30</b>  |
| <b>TABLA 5.4: CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS LIPO .....</b>     | <b>34</b>  |
| <b>TABLA 9.1: RESUMEN DE TIEMPO EN CADA VÍA.....</b>             | <b>105</b> |
| <b>TABLA 9.2: RESUMEN ENERGÍA DEMANDADA A LA BATERÍA .....</b>   | <b>105</b> |

# Índice de Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>PALABRAS CLAVE</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>ÍNDICE GENERAL</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>12</b> |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>3. UN POCO DE HISTORIA</b> .....   | <b>14</b> |
| <b>4. CONTEXTO Y EVOLUCIÓN DEL SECTOR</b> .....   | <b>18</b> |
| <b>5. COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS</b> .....          | <b>19</b> |
| 5.1 BATERÍA.....  | 20        |
| 5.1.1 <i>Concepto de batería</i> .....  | 20        |
| 5.1.2 <i>Características de las baterías desde un punto de vista constructivo</i> ..... | 21        |
| 5.1.3 <i>Parámetros fundamentales de las baterías</i> .....                             | 24        |
| 5.1.4 <i>Tipos de Baterías</i> .....  | 27        |
| 5.1.4.1 <i>Baterías de Plomo-Ácido</i> .....  | 27        |
| 5.1.4.2 <i>Baterías de Níquel-Metal Hidruro</i> .....                                   | 29        |
| 5.1.4.3 <i>Baterías de Ion-Litio</i> .....  | 31        |
| 5.1.4.4 <i>Baterías de Polímero de Litio</i> .....                                      | 33        |
| 5.1.4.4 <i>Baterías Zebra o de sal fundida</i> .....                                    | 35        |
| 5.2 SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS (BMS) .....  | 36        |
| 5.3 MOTOR ELÉCTRICO.....  | 38        |
| 5.3.1 <i>Introducción</i> .....   | 38        |
| 5.3.2 <i>Fundamentos de operación</i> .....   | 39        |
| 5.3.3 <i>Partes fundamentales del motor eléctrico</i> .....                             | 40        |
| 5.3.4 <i>Tipologías del motor eléctrico</i> .....                                       | 43        |
| 5.3.4.1 <i>Motor de corriente continua sin escobillas (Brushless)</i> .....             | 43        |
| 5.3.4.2 <i>Motor asíncronos o de inducción</i> .....                                    | 47        |
| 5.3.4.3 <i>Motor síncrono de imanes permanentes</i> .....                               | 50        |
| 5.3.4.4 <i>Motor síncrono de reluctancia conmutada o variable</i> .....                 | 52        |
| 5.3.4.5 <i>Motor de flujo axial</i> .....   | 53        |
| 5.4 INVERSOR.....   | 54        |
| 5.5 CONVERTIDOR Y CARGADOR INTEGRADO.....   | 56        |
| 5.6 REDUCTOR .....  | 58        |
| <b>6. VEHÍCULOS HÍBRIDOS</b> .....  | <b>59</b> |
| 6.1 TIPOS DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS.....  | 60        |
| 6.1.1 <i>Microhíbridos</i> .....  | 60        |
| 6.1.2 <i>Híbridos suaves o “Mild Hybrid”</i> .....                                      | 62        |
| 6.1.3 <i>Híbridos completos o “Full Hybrid” (HEV)</i> .....                             | 62        |
| 6.1.4 <i>Híbridos enchufables o “Plug-in Hybrid” (PHEV)</i> .....                       | 64        |
| 6.1.5 <i>Híbridos de rango extendido o (EREV)</i> .....                                 | 65        |
| <b>7. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS</b> .....  | <b>66</b> |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>8. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO ELECTROMECAÁNICO .....</b> | <b>68</b> |
| 8.1 SELECCIÓN DE LA CARGA .....  | 68        |
| 8.2 CÁLCULO DE LA FUERZA Y LA POTENCIA .....                                   | 70        |
| 8.2.1 <i>Cálculo de la Fuerza</i> .....  | 70        |
| 8.2.2 <i>Cálculo de la Potencia</i> .....                                      | 73        |
| 8.3 SELECCIÓN DEL MOTOR.....   | 73        |
| 8.4 SELECCIÓN DEL ACOPLE CARGA-MOTOR .....                                     | 74        |
| 8.4.1 <i>Curva del par de la carga</i> .....                                   | 76        |
| 8.5 PARÁMETROS DEL ACCIONAMIENTO .....   | 76        |
| 8.5.1 <i>Par e Intensidad de Arranque</i> .....                                | 77        |
| 8.5.2 <i>Par máximo y velocidad a la que se produce</i> .....                  | 77        |
| 8.5.3 <i>Potencia máxima y velocidad a la que se produce</i> .....             | 78        |
| 8.5.4 <i>Capacidad de sobrecarga</i> .....                                     | 79        |
| 8.6 PARÁMETROS DEL PUNTO DE FUNCIONAMIENTO (RÉGIMEN PERMANENTE) .....          | 80        |
| 8.6.1 <i>Análisis energético de potencias</i> .....                            | 81        |
| 8.7 RÉGIMEN TRANSITORIO .....  | 83        |
| 8.7.1 <i>Arranque directo</i> .....  | 83        |
| 8.7.2 <i>Arranque estrella-triángulo</i> .....                                 | 84        |
| <b>9. CICLO DE CONDUCCIÓN .....</b>  | <b>85</b> |
| 9.1 AUTOVÍA.....   | 86        |
| 9.1.1 <i>Parámetros de la Carga</i> .....                                      | 86        |
| 9.1.1.1 <i>Cálculos de Fuerza</i> .....  | 86        |
| 9.1.1.2 <i>Cálculos de Potencia</i> .....                                      | 87        |
| 9.1.1.3 <i>Acople Carga-Motor</i> .....  | 87        |
| 9.1.1.4 <i>Expresión y curva par-velocidad</i> .....                           | 87        |
| 9.1.2 <i>Parámetros del punto de funcionamiento</i> .....                      | 88        |
| 9.1.2.1 <i>Análisis energético de potencias</i> .....                          | 89        |
| 9.2 VÍA INTERURBANA .....  | 90        |
| 9.2.1 <i>Parámetros de la Carga</i> .....                                      | 90        |
| 9.2.1.1 <i>Cálculos de Fuerza</i> .....  | 90        |
| 9.2.1.2 <i>Cálculos de Potencia</i> .....                                      | 90        |
| 9.2.1.3 <i>Acople Carga-Motor</i> .....  | 91        |
| 9.2.1.4 <i>Expresión y curva par-velocidad</i> .....                           | 91        |
| 9.2.2 <i>Parámetros del punto de funcionamiento</i> .....                      | 92        |
| 9.2.2.1 <i>Análisis energético de potencias</i> .....                          | 93        |
| 9.3 VÍA URBANA 1 .....   | 94        |
| 9.3.1 <i>Parámetros de la Carga</i> .....                                      | 94        |
| 9.3.1.1 <i>Cálculos de Fuerza</i> .....  | 94        |
| 9.3.1.2 <i>Cálculos de Potencia</i> .....                                      | 94        |
| 9.3.1.3 <i>Acople Carga-Motor</i> .....  | 94        |
| 9.3.1.4 <i>Expresión y curva par-velocidad</i> .....                           | 95        |
| 9.3.2 <i>Parámetros del punto de funcionamiento</i> .....                      | 95        |
| 9.3.2.1 <i>Análisis energético de potencias</i> .....                          | 96        |
| 9.4 VÍA URBANA 2 .....   | 97        |
| 9.4.1 <i>Parámetros de la Carga</i> .....                                      | 97        |
| 9.4.1.1 <i>Cálculos de Fuerza</i> .....  | 97        |
| 9.4.1.2 <i>Cálculos de Potencia</i> .....                                      | 98        |
| 9.4.1.3 <i>Acople Carga-Motor</i> .....  | 98        |
| 9.4.1.4 <i>Expresión y curva par-velocidad</i> .....                           | 98        |
| 9.4.2 <i>Parámetros del punto de funcionamiento</i> .....                      | 99        |
| 9.4.2.1 <i>Análisis energético de potencias</i> .....                          | 100       |
| 9.5 VÍA URBANA 3 .....   | 101       |
| 9.5.1 <i>Parámetros de la Carga</i> .....                                      | 101       |



|   |            |
|---|------------|
| 9.5.1.1 Cálculos de Fuerza .....                                  | 101        |
| 9.5.1.2 Cálculos de Potencia .....                                | 101        |
| 9.5.1.3 Acople Carga-Motor.....                                   | 102        |
| 9.5.1.4 Expresión y curva par-velocidad.....                      | 102        |
| 9.5.2 <i>Parámetros del punto de funcionamiento</i> .....         | 103        |
| 9.5.2.1 Análisis energético de potencias.....                     | 104        |
| 9.6 ANÁLISIS ENERGÉTICO COMPLETO .....                            | 105        |
| <b>10. CÁLCULO DE SECCIONES.....</b>                              | <b>106</b> |
| 10.1 MÁXIMA CAÍDA DE TENSIÓN PERMITIDA.....                       | 106        |
| 10.2 INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE.....                             | 107        |
| <b>11. CONCLUSIONES .....</b>                                     | <b>108</b> |
| <b>12. BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                     | <b>109</b> |
| <b>13. PLIEGO DE CONDICIONES .....</b>                            | <b>114</b> |
| 13.1 CONDICIONES GENERALES .....                                  | 114        |
| 13.1.1 <i>Introducción</i> .....                                  | 114        |
| 13.1.2 <i>Reglamentos y normas</i> .....                          | 115        |
| 13.1.3 <i>Materiales</i> .....                                    | 115        |
| 13.1.4 <i>Ejecución de las obras</i> .....                        | 115        |
| 13.1.4.1 <i>Comienzo</i> .....                                    | 115        |
| 13.1.4.2 <i>Plazo de ejecución</i> .....                          | 115        |
| 13.1.4.3 <i>Libro de Órdenes</i> .....                            | 116        |
| 13.1.5 <i>Interpretación y desarrollo del proyecto</i> .....      | 116        |
| 13.1.6 <i>Obras complementarias</i> .....                         | 116        |
| 13.1.7 <i>Modificaciones</i> .....                                | 117        |
| 13.1.8 <i>Obra defectuosa</i> .....                               | 117        |
| 13.1.9 <i>Medios Auxiliares</i> .....                             | 117        |
| 13.1.10 <i>Conservación de las obras</i> .....                    | 117        |
| 13.1.11 <i>Recepción de las obras</i> .....                       | 117        |
| 13.1.11.1 <i>Recepción provisional</i> .....                      | 117        |
| 13.1.11.2 <i>Plazo de garantía</i> .....                          | 118        |
| 13.1.11.2 <i>Recepción definitiva</i> .....                       | 118        |
| 13.1.12 <i>Contratación de la empresa</i> .....                   | 118        |
| 13.1.12.1 <i>Modo de contratación</i> .....                       | 118        |
| 13.1.12.2 <i>Presentación</i> .....                               | 118        |
| 13.1.12.3 <i>Selección</i> .....                                  | 118        |
| 13.1.13 <i>Fianza</i> .....                                       | 118        |
| 13.1.14 <i>Descripción general del montaje</i> .....              | 119        |
| 13.2 CONDICIONES ECONÓMICAS .....                                 | 119        |
| 13.2.1 <i>Abono de la obra</i> .....                              | 119        |
| 13.2.2 <i>Precios</i> .....                                       | 119        |
| 13.2.3 <i>Revisión de los precios</i> .....                       | 120        |
| 13.2.4 <i>Penalizaciones</i> .....                                | 120        |
| 13.2.5 <i>Contrato</i> .....                                      | 120        |
| 13.2.6 <i>Responsabilidades</i> .....                             | 120        |
| 13.2.7 <i>Rescisión del contrato</i> .....                        | 121        |
| 13.2.8 <i>Liquidación en caso de rescisión del contrato</i> ..... | 121        |
| 13.2.9 <i>Cláusula del proyecto</i> .....                         | 121        |
| 13.3 CONDICIONES FACULTATIVAS .....                               | 122        |
| 13.3.1 <i>Normas a seguir</i> .....                               | 122        |
| 13.3.2 <i>Personal</i> .....                                      | 122        |
| 13.3.3 <i>Reconocimientos y ensayos previos</i> .....             | 122        |



|   |            |
|---|------------|
| 13.3.4 Materiales .....                                 | 123        |
| 13.3.4.1 Calibraciones .....                            | 123        |
| 13.3.5 Ensayos .....                                    | 123        |
| 13.3.6 Condiciones de ejecución .....                   | 124        |
| 13.3.6.1 Encargo y compra del material .....            | 124        |
| 13.3.6.2 Ensayos, verificaciones y medidas .....        | 124        |
| 13.3.7 Ensayos de aparamenta .....                      | 124        |
| 13.3.8 Ensayos del motor .....                          | 125        |
| 13.3.9 Varios .....                                     | 125        |
| 13.4 CONDICIONES TÉCNICAS .....                         | 125        |
| 13.4.1 Generalidades de los equipos eléctricos .....    | 125        |
| 13.4.2 Motor eléctrico .....                            | 127        |
| 13.4.2.1 Pruebas de recepción a realizar al motor ..... | 127        |
| <b>14. PRESUPUESTO .....</b>                            | <b>129</b> |
| 14.1 MEDICIONES .....                                   | 129        |
| 14.1.1 Tren de potencia .....                           | 129        |
| 14.1.2 Sensores e instrumentación .....                 | 129        |
| 14.1.3 Mano de obra .....                               | 129        |
| 14.2 PRECIOS UNITARIOS .....                            | 130        |
| 14.2.1 Tren de Potencia .....                           | 130        |
| 14.2.2 Sensores e instrumentación .....                 | 130        |
| 14.2.3 Mano de obra .....                               | 130        |
| 14.3 PRESUPUESTO PARCIAL .....                          | 131        |
| 14.3.1 Tren de Potencia .....                           | 131        |
| 14.3.2 Sensores e instrumentación .....                 | 131        |
| 14.3.3 Mano de obra .....                               | 131        |
| 14.4 PRESUPUESTO GENERAL .....                          | 132        |



# Dimensionado del sistema de accionamiento electromecánico de un vehículo eléctrico

---

Trabajo Final del Grado de Ingeniería  
Electrónica Industrial y Automática

**Autor: Fernando Haro Javaloyes**

**3 de Julio del 2020**

## **Memoria**

# 1. Introducción

---

Cada día, las nuevas generaciones se van haciendo más conscientes del impacto que ha generado la humanidad en nuestro planeta Tierra y, en consecuencia, nos vemos en la necesidad de ir modificando nuestra conducta, tecnología, hábitos y filosofía de vida hacia la meta del desarrollo sostenible.

Es por ello que la constante actualización de la tecnología para con los focos de interés humanos ha introducido conceptos como ahorro energético, consumo responsable o responsabilidad social y ambiental. Al fin y al cabo, es natural pensar en las consecuencias de nuestras acciones y, por ello, se han de satisfacer las necesidades del presente sin tener que comprometer las capacidades del futuro.

El sector de los transportes y en específico, el del automóvil no puede quedarse atrás con este cambio tan trascendental al que nos exponemos. Ya no es noticia la contribución que realizan los combustibles fósiles al calentamiento global, ni tampoco el agotamiento del “oro negro” que impulsa a los vehículos convencionales.

En consecuencia, se están realizando inversiones en estudiar alternativas viables que puedan sustituir la movilidad actual, basada en el motor de combustión, con nuevas tecnologías. Por ello, se retoma la investigación en la energía eléctrica, dando como resultado la hibridación y electrificación de los vehículos.

La introducción de los vehículos híbridos y eléctricos va a suponer un cambio sustancial en los modelos de movilidad de nuestra sociedad. Además, estos vehículos nos brindan una gran oportunidad para mejorar la eficiencia global del sistema eléctrico, reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuir nuestra dependencia energética del exterior.

Aunque también es importante señalar que simplemente sustituir los vehículos convencionales por otros híbridos o eléctricos no solucionará todos los problemas asociados al transporte. Si bien pueden contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la contaminación atmosférica y el ruido, estos vehículos no resolverán la congestión o la demanda de nuevas infraestructuras viarias y de más espacio de estacionamiento.

Para que el transporte sea realmente sostenible, debemos replantear, como sociedad, todo nuestro sistema de movilidad buscando formas innovadoras de reducir nuestra dependencia de los vehículos. Esto puede incluir cambios como utilizar programas de vehículo compartido, desarrollar mejores infraestructuras de transporte público y aumentar el uso de medios de transporte de bajas o cero emisiones.

## 2. Objetivos

---

El presente Trabajo de Fin de Grado, a grandes rasgos, tiene dos principales objetivos. Éstos van asociados a las dos partes del trabajo: la primera, la parte documental, pretende informar y explicar al lector la historia, el funcionamiento básico, la tipología y los componentes de los vehículos híbridos y eléctricos. La segunda parte, de carácter más técnico, consiste en el desarrollo del dimensionado del sistema de accionamiento electromecánico del vehículo Nissan Leaf. Además, se simulará un ciclo de conducción, exponiendo al motor dimensionado a distintos emplazamientos con distintas características de puntos de funcionamiento.

De forma más específica, lo que se pretende lograr en la parte documental es exponer la información necesaria como para que el individuo que tenga interés en documentarse sobre la electrificación de los vehículos, pese a no tener conocimientos previos en la materia, sea capaz de comprender e interiorizar los conceptos necesarios para realizar el seguimiento de la parte técnica del dimensionamiento.

Por otra parte, la intención de la parte técnica es desarrollar un proyecto académico en el que poder aplicar los conocimientos obtenidos a lo largo de mi experiencia universitaria en mis estudios de grado. Asimismo, profundizaré en la materia que resulta un foco de interés personal para el desarrollo de un posible futuro profesional en el sector de la electrificación de los vehículos.

### 3. Un poco de historia

La historia del vehculo elèctrico es la del renacer de un mercado que inicialmente tuvo sus oportunidades en la època preindustrial, con una posterior decadencia y un resurgir entorno al aao 1990 y de nuevo en los aaos actuales. Por tanto, destacan tres importantes revoluciones del vehculo elèctrico.

Los primeros automòviles surgen a mediados del siglo XIX, aunque ya en el siglo XVII existían diversos mecanismos, como el motor de vapor, que sustituía el empleo de animales o al propio ser humano como elementos de tracci3n.

Entre los aaos 1832 y 1839, el escocés Robert Anderson desarroll3 el primer vehculo elèctrico puro de batería no recargable, marcando un hito importante en la historia del autom3vil. En esos aaos tambi3n, el profesor Sibrandus Stratingh de Groningen, Holanda, diseo y construy3 con la ayuda de Christopher Becker otro pequeo autom3vil elèctrico basándose en un modelo a vapor.



Figura 3.1: Coche elèctrico de Robert Anderson

Gracias a las mejoras de los acumuladores elèctricos, por parte de los franceses Gaston Planté (1865) y Camille Faure (1881), comenzaron a aumentar el nùmero de vehculos elèctricos, sobre todo en Francia, Gran Bretaña y Estados Unidos, los cuales apoyaron el desarrollo generalizado de vehculos elèctricos. En 1867, en la Exposici3n Mundial de París, el inventor Franz Kravogl expuso un ciclo de dos ruedas que era impulsado por un motor elèctrico.

En 1899, despu3s de la irrupci3n del vehculo de gasolina en 1886 desarrollado por Karl Benz, un vehculo elèctrico con forma de bala supero la barrera de los 100 km/h (105,882 km/h), La Jamais Contente.



Figura 3.2: La Jamais Contente, de Camille Jenatzy

En 1900 circulaban más vehículos eléctricos que a gasolina y en 1911 se fabricó el primer híbrido eléctrico a manos de la firma Woods Motos Vehicle Company. La idea de que el auto estuviera listo tan pronto, evitando el largo proceso de arranque de los vehículos a vapor o la manivela en los de gasolina, agradaba a la gente. En 1907 se diseñó un modelo muy popular en la época bajo la firma Anderson Electric Car. Era el Detroit Electric, que data de 1912, y estaba disponible con varios estilos de carrocería.

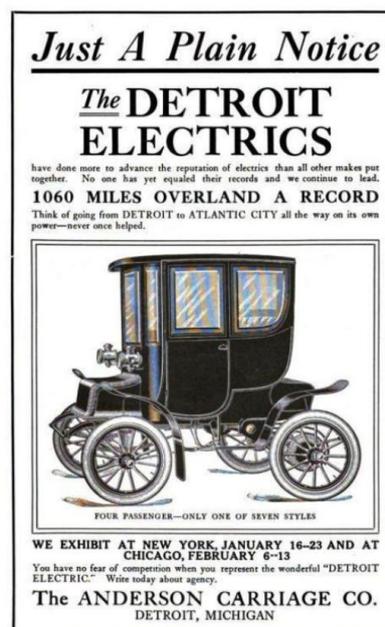


Figura 3.3: Anuncio Publicitario del Detroit Electric

En estos años se introdujo el arranque eléctrico en los vehículos de gasolina, con lo que se acababa de la molesta manivela de arranque. Esta innovación junto con el sistema de producción en cadenas de montaje de forma relativamente barata implantado por Ford fueron los factores que hicieron que el vehículo eléctrico desapareciera. A todo esto, se unió el inicio de la Primera Guerra Mundial en 1914, en donde la velocidad y la potencia en el campo de batalla resultaron fundamentales. El petróleo también comenzó a distribuirse de forma global, lo que hizo que los avances en el vehículo de combustión se sucedieran más rápidamente que en el eléctrico, por consiguiente, el motor de combustión interna aumentó mucho su popularidad.

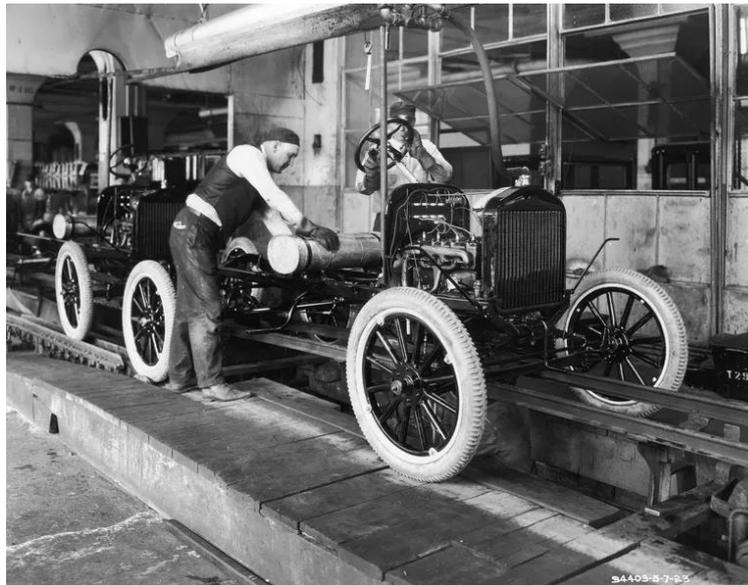


Figura 3.4: Lnea de ensamblaje de Ford

A finales de 1930, la industria del autom3vil elèctrico desapareci3 casi por completo, quedando algunas aplicaciones industriales en las que se empleaba este tipo de motor, como por ejemplo los montacargas.

En los aros 60, tras la Segunda Guerra Mundial, se empieza a tener consciencia sobre la sostenibilidad del planeta. Sin embargo, fue la crisis del petr3leo de 1973 el detonante para la reparaci3n de los vehculos elèctricos. Esta situaci3n forz3 a los fabricantes de vehculos de todo el mundo a mejorar su eficiencia, teniendo que buscar alternativas al petr3leo y sus derivados. El vehculo elèctrico se convirti3 en una soluci3n a los crecientes problemas de contaminaci3n y escasez energètica.

Una figura importante en la movilidad elèctrica fue General Motors, que tras la creaci3n de un vehculo que era impulsado por energa solar para una competici3n en Australia, el Sunraycer, y comprobado su buen funcionamiento, desarrollo en 1996 el EV1. Este vehculo completamente elèctrico, cuyas siglas significan Experimental Vehicle 1, tena una autonomia pr3xima a los 200 km y una estructura exterior de aluminio con un diseo futurista.

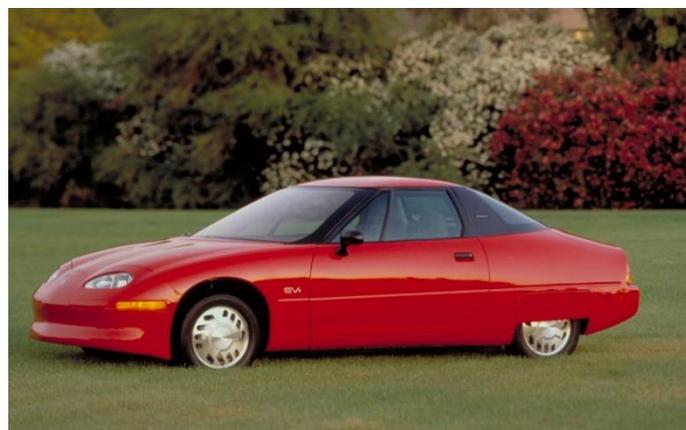


Figura 3.5: EV-1 de General Motors

La creación de este modelo estaba motivada por la implantación de una normativa cada vez más comprometida con el medio ambiente, y es que, en California se impuso la Ley “Zero Emission Mandatory”, encaminada a promover los vehículos de cero emisiones. Del EV-1 se fabricaron algo más de 1.000 unidades. La demanda continuó creciendo de manera moderada, pero también surgieron una serie de detractores. La industria petrolera y los intereses económicos de la industria del automóvil y políticas provocaron una flexibilización de la Ley anterior, denominando a esta nueva la Ley “Zero Emission Regulatory”, que era menos restrictiva y favoreció la entrada de los vehículos híbridos y propulsados por gas y biocombustibles. Por tanto, el poder de las grandes industrias de automóviles en todo el mundo hizo que se dejara de lado la fabricación del vehículo eléctrico de nuevo.

En el siglo XXI, desde el punto de vista ambiental, la polución causada por el elevado número de vehículos de combustión se convierte en un problema a escala mundial, y se comienza a tener conciencia de términos como “eficiencia energética” y “sostenibilidad”, los cuales están ligados con el desarrollo de energías alternativas como los vehículos eléctricos.

En 2006, Elon Musk presentó su primer modelo de vehículo eléctrico, el Tesla Roadster, con una autonomía de casi 400 km y una aceleración de 0 a 100 en menos de 4 segundos, y con él que comenzó una carrera de los fabricantes en conseguir mejores prestaciones en el sector de la movilidad eléctrica.



Figura 3.6: Tesla Roadster, de 2008

Quedan barreras por superar, como una mayor autonomía de las baterías, el desarrollo de una red de recarga pública y el impulso de las campañas de concienciación acerca de las ventajas que ofrece la movilidad eléctrica, pero a pesar de estas dificultades el vehículo eléctrico ha venido para quedarse, por lo que acabarán sustituyendo completamente a los vehículos convencionales con motores térmicos.

## 4. Contexto y evolución del Sector

---

Aunque hay varios estudios y análisis no del todo coincidentes, incluso en ocasiones contradictorios sobre cómo será la transición de la industria del automóvil, todo parece apuntar hacia la electrificación de los motores y la movilidad compartida. La caída de las ventas que experimentan los mercados europeos, en parte, causada por la incertidumbre ante la proliferación de las leyes, regulaciones y planes para reducir las emisiones contaminantes y gases GEI, parece haber iniciado un cambio de tendencia que abre la puerta definitivamente al vehículo eléctrico (VE).

El sector del automóvil vive un continuo y constante proceso de transformación desde hace algunos años, provocando así cambios trascendentales que se manifiestan a través de diversos signos:

- El “diesel gate” como síntoma de la resistencia ofrecida por la industria a abandonar la tecnología clásica el motor de combustión ante el endurecimiento de la normativa internacional para limitar las emisiones contaminantes y la lucha contra el cambio climático.
- La aparición de nuevos actores con tecnologías de electrificación y de vehículo conectado y autoconducción.
- El cambio cultural que se viene dando entre los más jóvenes, con menos poder adquisitivo y una sensibilidad ambiental que tiende a prescindir del vehículo privado en favor de medios no mecánicos, de transporte público, flotas compartidas (car sharing) o coche compartido (car pooling).

La sintomatología que presenta el sector es la típica de una revolución tecnológica en la que el cambio de paradigma tecnológico (innovaciones + cambios en el marco regulatorio) comporta, en pleno proceso de destrucción creativa, una reorganización de la estructura productiva y, eventualmente, también una transformación profunda de las instituciones gubernamentales, de la sociedad e incluso de la ética y cultura dominantes.

Después de una crisis por la caída brusca de la demanda durante los años de recesión, la industria del automóvil se mueve en Europa a remolque de la agenda europea contra el cambio climático y la protección del medio ambiente, y de las regulaciones nacionales que se derivan de las directivas internacionales.

## 5. Componentes principales de los vehículos híbridos y eléctricos

---

Tanto la electrificación como la hibridación de los vehículos no son tareas fáciles de realizar dada la complejidad de la sincronía que han de llevar todos los elementos para que el sistema como conjunto llegue a funcionar de la mejor manera posible. Además, debido a la innovación tecnológica aplicada, es necesaria la obtención de unos buenos resultados relativos al consumo, emisión de residuos contaminantes y prestaciones.

“Híbrido” significa que es producto de dos elementos de distinta naturaleza. En el caso de los vehículos, nos centramos en dos ítems: el almacenamiento de energía y el cómo transformarla. Es decir, un vehículo híbrido tendrá como mínimo dos sistemas de almacenamiento de energía y dos motores distintos. Centrándonos en la electrificación, nos referimos a la batería y al motor eléctrico, sumados al depósito de gasolina o diésel convencional y al motor de combustión interna.

Están vistos como la transición entre los vehículos térmicos convencionales y los vehículos puramente eléctricos ya que son más eficientes que los primeros, pero no terminan de eliminar la emisión de residuos contaminantes a la atmósfera. Además, para el correcto funcionamiento de los híbridos, es necesario introducir otros elementos fundamentales como un inversor y un BMS (Battery Management System), que es un sistema electrónico cuya función es asegurar el funcionamiento óptimo y seguro de las baterías mediante el control de todos los parámetros implicados en el sistema.

En cuanto al vehículo puro eléctrico, su funcionamiento es mucho más sencillo que el de un híbrido, ya que el número de componentes y de piezas se reduce en gran medida. De esta manera, optimizamos tanto el mantenimiento como la posibilidad de sufrir averías. Junto a esto, se une el hecho de que no producen emisiones y son muy silenciosos, por tanto es un mercado que tendrá un auge explosivo. Sin embargo, estos vehículos tienen mucho margen de mejora, ya que tienen serias desventajas como pueden ser la escasa autonomía, los tiempos de recarga, y el elevado peso de las baterías, que produce un impacto en las prestaciones del vehículo.

## 5.1 Batería

### 5.1.1 Concepto de batería

Una batería es un dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en corriente eléctrica. Cada celda consta de un electrodo positivo, o ánodo, un electrodo negativo, o cátodo, y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, permitiendo que la corriente fluya fuera de la batería para llevar a cabo su función, alimentar un circuito eléctrico.

También existen las baterías recargables, que son capaces de convertir la energía eléctrica en energía química durante el proceso de carga, y de convertir la energía química en eléctrica durante la descarga. Estas conversiones son debidas a reacciones electroquímicas de oxidación/reducción. Para que estas conversiones puedan llevarse a cabo, es necesario dos electrodos metálicos vinculados mediante un medio llamado electrolito.

No hay que olvidar que las baterías son generadores secundarios, o sea, que no pueden funcionar sin que se les haya suministrado electricidad previamente. Una vez cargadas, la energía química de los materiales activos de los electrodos se puede transformar directa y espontáneamente en energía eléctrica mediante reacciones red-ox reversibles. Estas reacciones llevan asociada la transferencia de electrones entre los electrodos, que produce la corriente eléctrica.

La batería es el componente principal en el desarrollo de todo vehículo híbrido o eléctrico. De ella dependen factores cruciales como la autonomía del vehículo y el mayor o menor coste de este. Con el objetivo de mejorar el rendimiento de los sistemas de baterías existentes y de desarrollar otros nuevos que cumplan las estrictas exigencias actuales se está promoviendo el estudio de esta tecnología y así poder:

- Aumentar la eficiencia energética del vehículo
- Promover el cambio de los combustibles actuales por otras fuentes de energía más sostenibles como la electricidad.
- Disminuir las emisiones nocivas de los vehículos y su impacto en el medio ambiente
- Mejorar la seguridad y prestaciones eléctricas de las baterías.

Las baterías destinadas a los vehículos híbridos y eléctricos tienen que ser capaces de soportar un elevado número de cargas y descargas durante su vida útil, sin perder capacidad de carga y permitiendo un funcionamiento correcto del conjunto de componentes. Debido a que la autonomía en modo eléctrico de los vehículos híbridos va a ser menos que en los eléctricos, las baterías tendrán menos capacidad, lo que conlleva a tener un menor tamaño y una instalación, en teoría, más fácil en el vehículo.

Un efecto importante que destacar, producido en las baterías, es el llamado “efecto memoria”. Este fenómeno se produce cuando se realiza la carga de una batería sin haber sido descargada del todo, lo que conduce a la creación de una especie de cristales en el interior que van a debilitar los electrodos. Como consecuencia, la batería pierde capacidad real debido a las cargas incompletas.

### 5.1.2 Características de las baterías desde un punto de vista constructivo

Las baterías están compuestas de distintos elementos, en todas ellas comunes, pero con características diferentes, lo que otorga distintas propiedades según el tipo de batería. La unidad básica de una batería es la celda, pudiendo estar una batería constituida por varias celdas conectadas en serie o en paralelo con el fin de conseguir la capacidad y tensión deseadas.

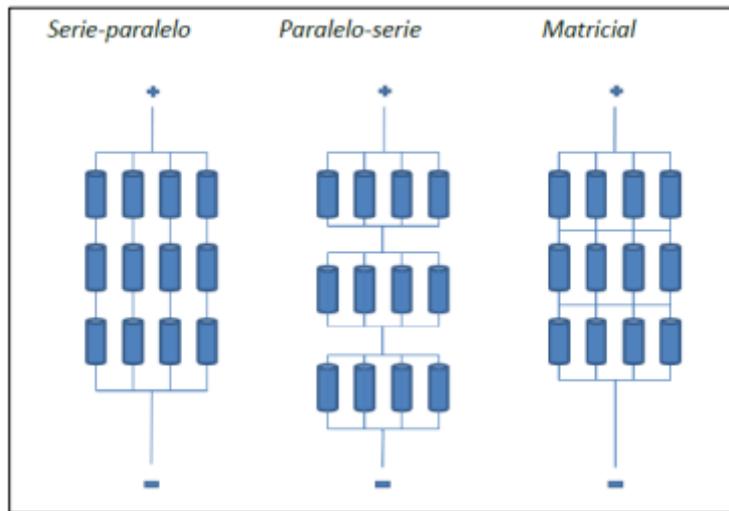


Figura 5.1: Posibles configuraciones de conexión en las celdas de una batería

Una celda electroquímica funciona en base a un proceso de reacciones químicas de oxidación y reducción; la oxidación es un proceso de liberación de electrones, mientras que la reducción es un proceso de captación de electrones. La celda es la unidad básica de una batería y está compuesta por un ánodo y un cátodo recubiertos por una rejilla conductora y sumergida en un electrolito, estando ambos separados por un aislante eléctrico o separador. Las principales reacciones químicas se producen en las conexiones ánodo-electrolito o cátodo-electrolito, según se desarrollen los procesos de carga y descarga.

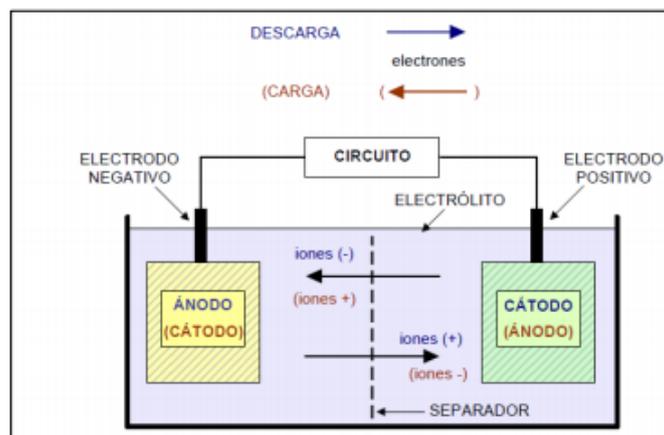


Figura 5.2: Componentes básicos de una celda recargable

Las principales características de cada uno de los componentes de una celda electroquímica son:

- **Cátodo o electrodo positivo:** Es el elemento que se reduce durante la descarga de la celda, aceptando electrones del circuito exterior aportados por el ánodo. Algunos ejemplos de electrodos positivos son el dióxido de plomo en baterías de plomo-ácido y una aleación de hidruro metálico en las baterías de níquel-metal hidruro.
- **Ánodo o electrodo negativo:** Es el elemento que se oxida durante la descarga de la celda, aportando electrones al circuito para que sean aceptados por el cátodo. Algunos ejemplos de electrodos negativos son el plomo en baterías de plomo-ácido y el hidróxido de níquel en las baterías de níquel-metal hidruro.

Durante la descarga, el ánodo aporta electrones debido a la oxidación y también genera iones positivos. De la misma forma, el cátodo produce iones negativos durante el proceso de aceptación de electrones.

Durante la carga, ocurren los mismos procesos electroquímicos debido a la reversibilidad de las reacciones de oxidación-reducción. Debido a la aportación de electricidad, el electrodo negativo se comportará como cátodo y el electrodo positivo actuará de ánodo.

Por lo general, el electrodo negativo está formado por un metal base y el electrodo positivo por un óxido metálico.

- **Rejilla:** Constituye la estructura mecánica del material activo y es el conductor eléctrico de la corriente generada por el sistema. Las características ideales que deben tener estos elementos son una elevada conductividad eléctrica, elevada resistencia mecánica y a la corrosión, buena adherencia de la superficie que se encuentre en contacto con el material activo y elevada sobretensión de desprendimiento de gases.
- **Material activo:** Elemento en el que se desarrollan las reacciones electroquímicas de oxidación/reducción. Es fundamental una fijación óptima de este con la rejilla para que su funcionamiento sea correcto. Las características buscadas en este elemento son una elevada tensión, lo que permite reducir el número de celdas a conectar en serie para alcanzar la tensión deseada; elevada eficiencia de las reacciones químicas que tienen lugar, que permite una eficiencia energética elevada en el proceso de conversión de la energía química en eléctrica y viceversa; bajo peso, para conseguir baterías mucho más ligeras; y que tenga una porosidad adecuada y buena cohesión, con lo que se consigue una celda con alta resistencia a esfuerzos mecánicos mejorando a su vez la estabilidad y fiabilidad durante los procesos de trabajo.

- **Electrolito:** Se trata de una solución acuosa acida, de una base o de sales, cuya finalidad es funcionar como conductor iónico permitiendo la transferencia de electrones en el interior de la celda entre el ánodo y el cátodo. Las principales 15 características a tener en cuenta cuando se selecciona un electrolito son la alta conductividad iónica, buena estabilidad térmica, bajo efecto corrosivo sobre los electrodos, bajo nivel de impurezas y bajo coste.
- **Separador:** Es un elemento de gran importancia en la celda, ya que proporciona el aislamiento eléctrico necesario entre el ánodo y el cátodo, evitando así cortocircuitos entre electrodos de diferente polaridad mientras permite una libre circulación de iones a través del electrolito. Para que el funcionamiento de la celda sea óptimo, el separador debe poseer un elevado aislante eléctrico, adecuada porosidad y permeabilidad, alta resistencia a la oxidación y bajo grado de impurezas y contaminantes.
- **Contenedor o caja:** Recipiente que contiene a todos los elementos de la celda mencionados anteriormente. El contenedor proporciona el soporte y la rigidez necesaria a la batería, por lo que sus principales características son una elevada resistencia dieléctrica y a los impactos, y sobre todo buena resistencia a la corrosión por la acción de los agentes químicos que contiene. En el interior del contenedor puede haber varias celdas interconectadas, proporcionando al conjunto una determinada tensión y capacidad. A este conjunto se le denomina "batería o monobloque". Algunas cajas están equipadas con una válvula de seguridad, encargada de expulsar los gases generados en el interior.

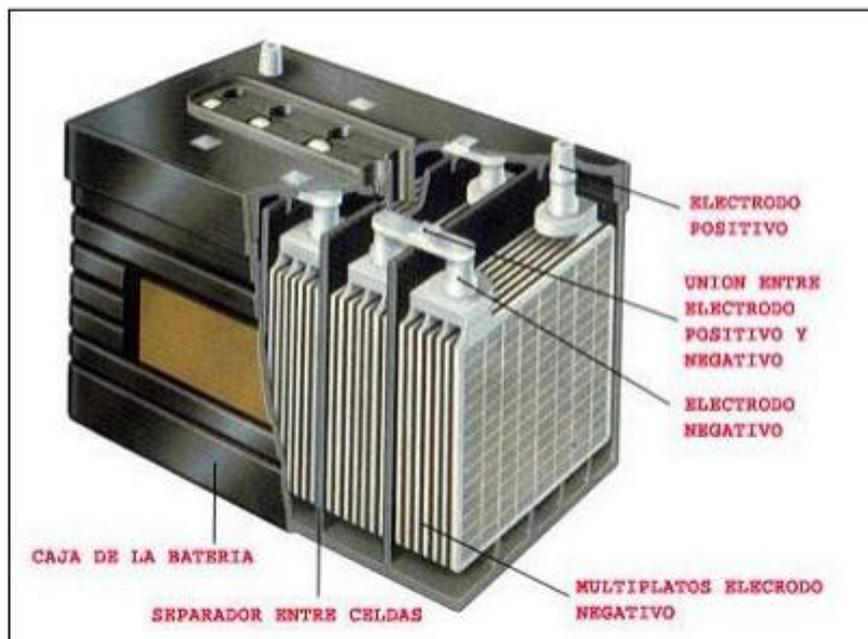


Figura 5.3: Estructura de una batería

### 5.1.3 Parámetros fundamentales de las baterías

Las características y prestaciones de las baterías vienen definidas por una serie de parámetros, los cuales definiremos y explicaremos para terminar de comprender su funcionamiento:

- **Tensión, voltaje o fuerza electromotriz:** Es un parámetro muy relevante a la hora de escoger la batería. En función de las celdas de cada batería, y según su conexión (serie o paralelo), se obtendrá el potencial deseado en cada caso. Se distingue entre:
  - **Tensión en vacío:** Es el voltaje que tiene una batería entre sus bornes cuando no se cierra el circuito en ellos. El valor de este parámetro dependerá de la naturaleza de los electrodos y del electrolito, así como de la temperatura de funcionamiento. Esta tensión irá disminuyendo durante la descarga de la batería, debido a las transformaciones químicas que tienen lugar en el electrolito y al aporte de energía que realiza.
  - **Tensión en circuito cerrado:** Es el voltaje que hay en los bornes de la batería cuando el circuito se encuentra cerrado al estar conectada una carga. Es importante disponer de celdas con voltaje alto, ya que de esta forma se reduce el número de elementos a conectar en serie para obtener un voltaje alto nominal de la batería. A medida que la batería suministra energía a la carga, la tensión disminuye.
- **Capacidad (C):** La capacidad de una batería es la cantidad de carga eléctrica total, medida en amperios-hora (Ah), que puede suministrar o almacenar una batería. Se definen diferentes medidas de capacidad en función de las condiciones en las que se realiza la medida:
  - **Capacidad nominal:** Capacidad que puede entregar una batería desde que está cargada completamente hasta alcanzar una tensión de descarga determinada, fijando unas condiciones de temperatura y patrón de descarga determinados. Dependerá fundamentalmente del régimen o velocidad de descarga, temperatura y tensión final a obtener. Estas condiciones estarán normalizadas por distintos organismos nacionales e internacionales.
  - **Capacidad real:** Capacidad que es capaz de entregar una batería desde su estado pleno de carga hasta alcanzar la tensión de descarga en unas condiciones de funcionamiento fijadas para la evaluación de la tensión nominal. La capacidad real, por lo general, será menor que la nominal. Dependerá de la razón de descarga seguida y la temperatura ambiente en el momento de funcionamiento.
  - **Capacidad retenida:** Es la capacidad que conserva la batería después de un periodo de tiempo en reposo o sin actividad.



Figura 5.4: Organización de las celdas de la batería de un Nissan Leaf (vehículo eléctrico)

- **Potencia específica:** Potencia por unidad de masa que puede suministrar la batería durante su descarga. Su unidad de medida es el W/kg.
- **Energía:** Es función del voltaje y cantidad de carga eléctrica que pueda almacenar. Su unidad es el Vatio-hora.

$$\text{Energía} = P \cdot t = V \cdot I \cdot t$$

Donde “P” es potencia, “V” es voltaje, “I” es intensidad de corriente y “t” es tiempo.

- **Energía específica:** Energía por unidad de masa que almacena la batería y su unidad de medida es el Wh/kg.

| ENERGÍA ESPECÍFICA DE ALGUNAS FUENTES DE ENERGÍA |                            |
|--|----------------------------|
| Fuentes de energía                               | Energía específica (Wh/kg) |
| Hidrógeno  | 33.300                     |
| Gasolina   | 12.500                     |
| Gas Natural                                      | 9.350                      |
| Carbón   | 8.200                      |
| Metanol  | 6.050                      |
| Batería de LiPo                                  | 200                        |
| Batería Ion Litio                                | 120                        |
| Batería de Ni-MH                                 | 50                         |
| Batería de Pb-Ácido                              | 30                         |

Tabla 5.1: Energía específica de distintas fuentes

- **Densidad de energía:** También denominada “energía específica volumétrica”, indica la cantidad de energía por unidad de volumen que puede almacenar la batería. Se mide en Wh/l.
- **Sobrecarga:** Suceso que tiene lugar cuando se continúa cargando una batería una vez se ha perdido la eficiencia de las reacciones químicas durante la carga.
- **Autodescarga:** Pérdida de capacidad de la batería debida a no estar conectada a una carga, es decir, por encontrarse en circuito abierto.
- **Estado de carga (State Of Charge - SOC):** Porcentaje que indica la cantidad de carga de la batería respecto al cien por cien de la capacidad cuando se encuentra totalmente cargada. Es un aspecto muy importante, ya que nos permite conocer el tiempo de autonomía y el estado de cada celda, permitiendo así, comprobar si las celdas se cargan de manera uniforme y verificar que no realizan esfuerzos excesivos.
- **Profundidad de descarga (Depth Of Discharge – DOD):** Relación entre la capacidad en amperios-hora (Ah) entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma.
- **Rendimiento:** Relación porcentual entre la energía eléctrica recibida en el proceso de carga y la que el acumulador entrega durante la descarga.
- **Tiempo de recarga:** Tiempo necesario para restablecer la energía que puede almacenar la batería. Dependiendo de la potencia y el tipo de instalación que se utilice para efectuar esta recarga, el tiempo de recarga varía considerablemente. Actualmente, con la carga super rápida es posible que dure menos de 30 minutos. Pero el tiempo de recarga convencional, oscila entre las 5 y 8 horas. También hay puntos de recarga semi rápida que pueden reducir esto a 3 horas.
- **Vida útil:** Tiempo que la batería puede seguir ofreciendo el servicio para el que ha sido diseñada sin que sus características fundamentales se degraden hasta unos límites predeterminados. También se define como el número de ciclos de carga/descarga que puede alcanzar la batería. Este tiempo está relacionado con el número de meses o años de funcionamiento de las baterías.

#### 5.1.4 Tipos de Baterías

El criterio que nos permite definir las tipologías de las baterías se basa en diferenciar las tecnologías empleadas para realizar esas reacciones químicas necesarias para transformar la energía química a eléctrica. Pese a ello, es necesario realizar una primera clasificación que depende del uso que vayan a tener y de la posibilidad de ser recargadas:

- **Baterías primarias:** Su reacción química es irreversible, es decir, una vez se ha descargado, no permiten ser recargadas. Por lo tanto, una vez se haya descargado la energía almacenada, la batería debe ser sustituida; son las denominadas *baterías desechables*". Son empleadas para requerimientos de baja potencia.
- **Baterías secundarias:** Su reacción química es reversible, por lo que después de que la batería se haya descargado, pueden volver a ser cargadas con el correspondiente suministro de corriente continua. Son las denominadas "*baterías recargables*". Tienen un amplio rango de capacidades y cada vez están adquiriendo un rol más importante en aplicaciones donde se requieren potencias elevadas, como se ve en este proyecto sobre los vehículos híbridos y eléctricos.

Es decir, que las tipologías que ahora mencionaremos se encuentran dentro de las baterías secundarias y, por tanto, recargables.

El objetivo perseguido por los investigadores y fabricantes es alcanzar unos determinados índices de funcionamiento, los cuales definen las características de los dispositivos electroquímicos ofrecen. En la última década se ha mejorado notablemente la tecnología relativa a las baterías, reduciendo su coste a la vez que se aumenta la capacidad de almacenamiento por unidad de peso y volumen, y eliminando en la medida de lo posible el efecto memoria, persiguiendo el aumento de la vida útil y permitiendo más ciclos de carga/descarga.

Todas las baterías que van a ser explicadas en este proyecto son de media y alta capacidad para trabajar bajo regímenes cíclicos de carga-descarga, diseñadas para ofrecer una elevada autonomía y las cuales se encuentran equipadas en todo tipo de vehículos híbridos o eléctricos.

##### 5.1.4.1 Baterías de Plomo-Ácido

Se trata de las baterías más antiguas (1859), por lo que su desarrollo ya está muy madurado. Esto hace que la mayoría de los vehículos las lleven instaladas. Gracias a su alta disponibilidad y bajo costo, estas baterías representan el 50% del mercado total de baterías, siendo tanto de clasificación primaria como secundaria

La mayoría de los vehículos de combustión interna las emplean como baterías de arranque o alimentación de sistemas, por lo que su tensión en estos casos es pequeña, de 12 V, con celdas de 2 V conectadas en serie, que proporcionan al circuito eléctrico corriente continua (CC). Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico en el que se encuentran una serie de placas de plomo dispuestas alternadamente según sea su polaridad positiva o negativa.

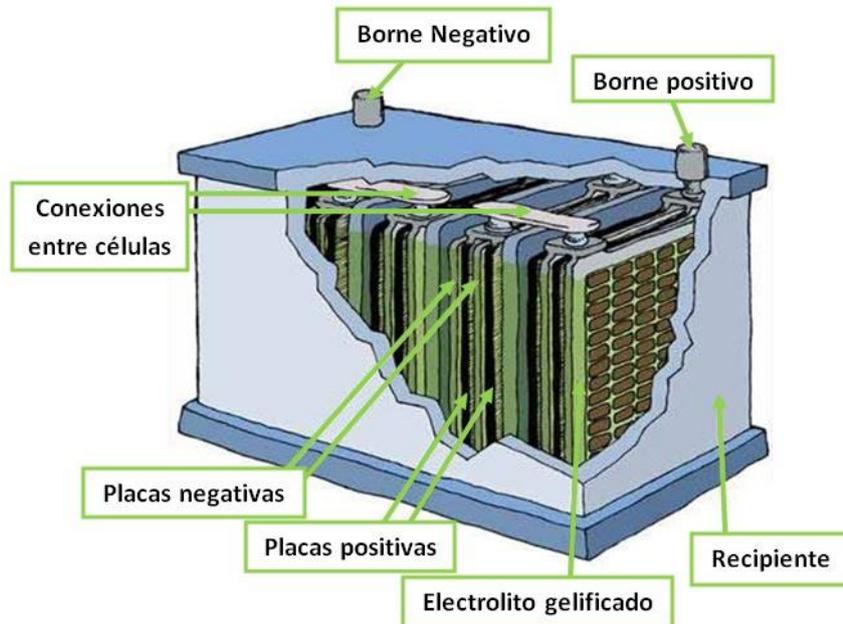


Figura 5.5: Partes de una batería Pb-Ácido

Durante la descarga, la corriente generada produce una reacción entre el electrodo positivo de dióxido de plomo ( $PbO_2$ ) con el electrodo negativo de plomo puro (Pb) y el electrolito de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), formando sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ) y agua ( $H_2O$ ). De esta forma, a medida que se descarga, baja la concentración de ácido sulfúrico. Aunque el proceso es reversible, nunca alcanza una eficiencia de conversión del 100%, ya que los electrodos pierden material con cada descarga y además hay pérdidas de energía durante el ciclo de carga/descarga.

Las reacciones que tienen lugar se muestran a continuación, indicándose de izquierda a derecha el proceso de descarga, y de derecha a izquierda el proceso de carga.



En cuanto a sus principales ventajas, destaca su facilidad de reciclado, bajo coste, buen comportamiento, buena capacidad para suministrar picos de corriente altos durante la descarga y su fiabilidad durante el funcionamiento. Por el contrario, sus principales desventajas son el bajo rango de energía específica y densidad energética, elevado peso debido a la alta densidad del plomo, elevados tiempos de recarga (entre 8 y 10 h), corta vida útil y poco aporte de autonomía, y sobre todo la presencia de compuestos tóxicos como el plomo y el riesgo de explosión.

Las principales características de este tipo de baterías están recogidas en la siguiente tabla:

|                              |                               |
|------------------------------|-------------------------------|
| Ánodo                        | Plomo puro esponjoso (Pb)     |
| Cátodo                       | Dióxido de Plomo              |
| Electrolito                  | Disolución de Ácido Sulfúrico |
| Energía específica           | 30 - 50 Wh/kg                 |
| Potencia específica          | 180 W/kg                      |
| Densidad energética          | 60 - 110 Wh/l                 |
| Eficiencia en carga/descarga | 50 - 95 %                     |
| Velocidad de autodescarga    | Menor del 5% mensual          |
| Durabilidad                  | 500 - 800 ciclos              |

Tabla 5.2: Características de las baterías Pb-Ácido

Como conclusión, estas baterías no son adecuadas para aplicaciones donde se requieran un elevado número de ciclos carga/descarga, por lo que su desarrollo futuro está dirigido a aumentar su vida útil con un menor mantenimiento y una reducción del tiempo de recarga.

#### 5.1.4.2 Baterías de Níquel-Metal Hidruro

El Níquel Metal-hidruro comenzó a introducirse en baterías comerciales a finales del siglo XX. Esta tecnología está adquiriendo un papel muy importante dentro de la industria automovilística de vanguardia, aunque tiene importantes competidores como lo son las baterías de Ion-Litio, de las que hablaremos más tarde.

Tienen un rendimiento similar a las de Níquel-Cadmio, pero estas últimas fueron prohibidas en Europa por su contenido en materiales altamente tóxicos (Cadmio). Tienen como principal diferencia la composición de sus electrodos. Como cátodo se emplea Oxihidróxido de níquel (NiOOH) y como ánodo, una aleación de hidruro metálico que mejora el comportamiento de la batería, aumentando la capacidad de carga por unidad de volumen. Generalmente, se emplean dos tipos de aleaciones metálicas: una conocida como aleación AB5 que se compone de Lantano-Níquel, y la otra denominada como AB2 con Titanio y Circonio. En cuanto al electrolito, está compuesto fundamentalmente por hidróxido de potasio.

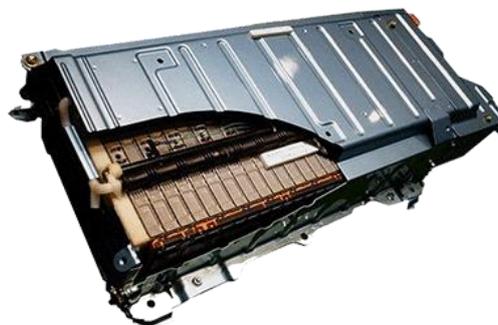
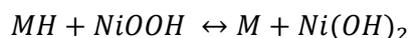


Figura 5.6: Batería de Ni-MH.

La reacción química que se produce en su interior, siguiendo el mismo criterio de carga y descarga, es la siguiente:



Cuando una batería de Níquel-Metal Hidruro se encuentra cargada, la aleación metálica permite almacenar el hidrógeno generado durante la carga y liberarlo durante la descarga. Este electrodo negativo es el responsable de que se consiga una mayor capacidad por unidad de volumen que en las baterías Níquel-Cadmio.

La densidad de energía producida por las baterías NiMH es el doble que las de NiCd a voltajes similares, el peso es mejor y también se ha conseguido reducir el efecto memoria, se mantiene el empleo del efecto “Delta de Peak” para determinar el fin del proceso de carga.

Prácticamente la totalidad de las baterías de Níquel-Hidruro Metálico que se comercializan actualmente son selladas. Esto se debe a la presencia del hidrógeno como parte del material activo y la necesidad de querer conservar este compuesto, ya que la pérdida del hidrógeno afectaría seriamente a la reversibilidad del sistema. Precisamente el principio de funcionamiento de esta tecnología se basa en las reacciones de absorción y desabsorción del hidrógeno en el electrodo negativo.

Se resumen las características de este tipo de baterías en la siguiente tabla:

|                              |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| Ánodo                        | Aleación de hidruro metálico   |
| Cátodo                       | Oxihidróxido de Níquel (NiOOH) |
| Electrolito                  | Hidróxido de Potasio           |
| Energía específica           | 60 - 120 Wh/kg                 |
| Potencia específica          | 250 - 1000 W/kg                |
| Densidad energética          | 140 - 300 Wh/l                 |
| Eficiencia en carga/descarga | 50 - 70 %                      |
| Velocidad de autodescarga    | 15 - 25% mensual               |
| Durabilidad                  | 1000 ciclos                    |

Tabla 5.3: Características de las baterías NiMH

En cuanto a sus principales inconvenientes destaca su alto nivel de autodescarga, su pobre funcionamiento a temperaturas extremas debido a la degradación de la aleación metálica, y su elevado coste de fabricación. Además, durante los procesos de carga, la batería se calienta en exceso, por lo que deben llevar integrado un sistema de refrigeración.

Hasta ahora, estas baterías han sido muy utilizadas en vehículos híbridos, entre los que destacan fabricantes como Toyota y Honda. Estos primeros, pioneros en la tecnología híbrida. Su uso se va reduciendo, siendo la tecnología de Ion-Litio, su principal sustituta.

### 5.1.4.3 Baterías de Ion-Litio

Las baterías de Ion-Litio están formadas por celdas que utilizan compuestos de intercalación de Litio como materiales positivos y negativos. En el ciclo de una batería, los iones de litio ( $\text{Li}^+$ ) se alternan entre los electrodos positivos y negativos. El material activo del electrodo positivo o cátodo suele ser óxido de metal, como por ejemplo el óxido de Litio-Cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ) o el óxido de Litio-Manganeso ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ). El ánodo suele ser un material de carbono, grafito o silicio.

Durante el proceso de carga, los átomos de litio existentes en el cátodo se transforman en iones de Litio que fluyen desde el electrodo positivo hacia el negativo, pero toman el camino más largo a través del circuito exterior. Una vez llegan al ánodo, los iones de Litio y los electrones se combinan, depositándose en el interior de las capas de carbono como átomos de litio.

Durante la descarga, los iones fluyen de vuelta a través del electrolito desde el electrodo negativo hacia el positivo, de nuevo, a través del circuito externo. Cuando los iones y electrones se combinan en el electrodo positivo, se depositan en este como átomo de Litio.

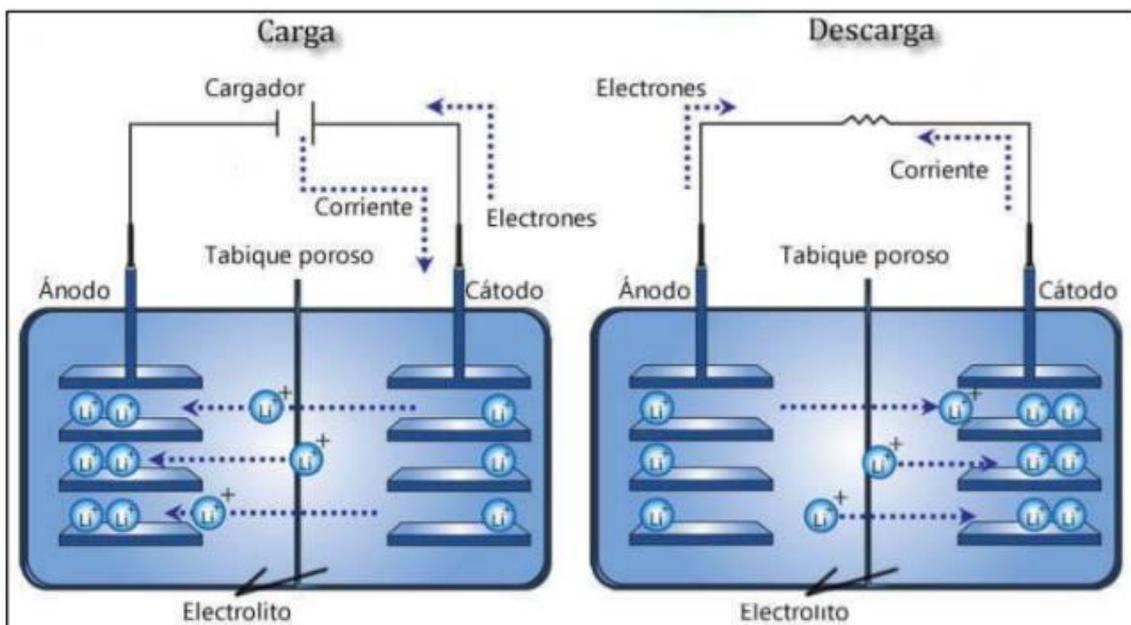


Figura 5.7: Esquema de funcionamiento de una batería de Ion-Litio

En funci3n del material empleado para los electrodos, las especificaciones elèctricas de la celda varian notablemente. En la siguiente figura se comparan las propiedades de las baterias de tecnologia Ion-Litio segun el material de sus electrodos:

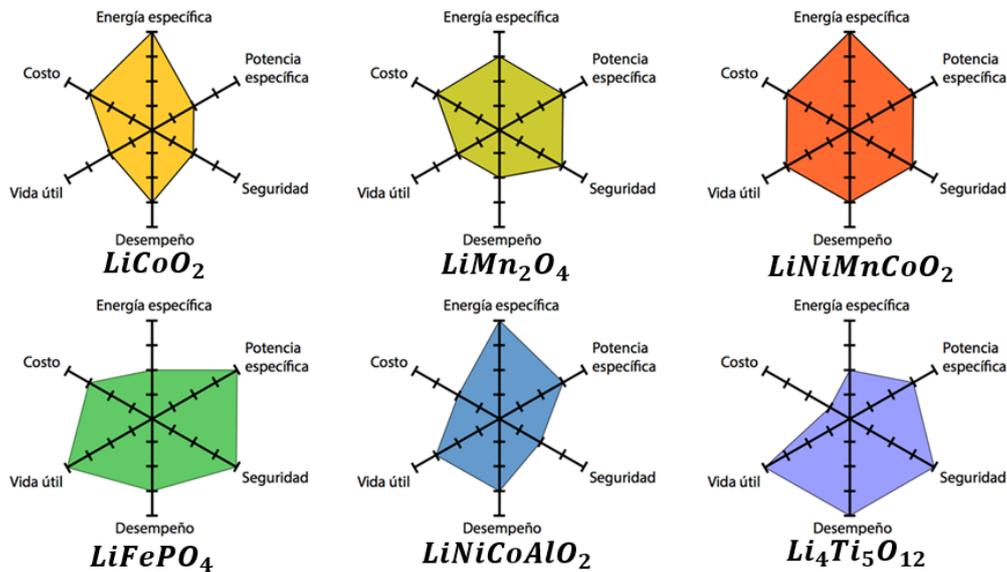


Figura 5.8: Propiedades de las baterias Ion-Litio segun material de electrodos

- **Óxido de Litio-Cobalto ( $LiCoO_2$ ):** Dado que no tienen suficiente potencia específica, se acabaron descartando de la industria automovilística. Pese a ello, se sigue utilizando este tipo de baterias en aplicaciones de baja potencia, como los ordenadores portátiles o mandos a distancia.
- **Óxido de Litio-Manganeso ( $LiMn_2O_4$ ):** Tiene menor energía específica que las anteriores, pero una mayor potencia específica, lo que las hace más equilibradas. Estas baterias han sido las pioneras de la tecnologia Ion-Litio en los vehículos eléctricos. Se han desarrollado mucho y han sido mejoradas recientemente. Como ejemplo de aplicación, se sabe que el primer Nissan Leaf, incorporaba este tipo de baterias.
- **Óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto ( $LiNiMnCoO_2$ ):** Este tipo de baterias ofrece en sus electrodos una combinación de materiales y sus propiedades, que le proporciona un equilibrio entre potencia y seguridad. En consecuencia, son la actual tendencia entre las marcas principales de vehículo eléctrico. Como ejemplo de aplicación, podemos encontrar el Renault Zoe.
- **Litio Ferrofosfato ( $LiFePO_4$ ):** Ofrecen una increíble seguridad, así como potencia específica y vida útil. Sin embargo, tienden al desuso ya que poseen muy poca energía específica. Para poder competir con las demás y alcanzar la energía necesaria, su batería debería pesar mucho, cosa que disminuiría las prestaciones del vehículo. Pese a ello, una marca china apostó por este tipo de baterias, incorporándolas a varios de sus modelos. Un ejemplo es el BYD e6.

- **Óxido de Litio Níquel Cobalto Aluminio ( $LiNiCoAlO_2$ ):** Poseen la más alta energía específica dentro de la tecnología de Ion-Litio. Además, el resto de sus propiedades son bastante competitivas. Sin embargo, son bastante caras en comparación con el resto, lo que hace que únicamente marcas como Tesla, es decir, conocidas por su prestigio y calidad, las incorporen en sus vehículos. Un ejemplo de aplicación es el Tesla Model 3.
- **Titanato de Litio ( $Li_4Ti_5O_{12}$ ):** Este tipo de baterías presentan una seguridad y durabilidad muy significativas. Pero, el resto de las características, como la energía y potencia específicas, son mediocres. Cosa que, sumada al precio que tienen, que es muy alto por la presencia del titanio, hace que resulten unas baterías que tienden al desuso. Un ejemplo de aplicación es el modelo de la marca japonesa, Mitsubishi MiEV.

#### 5.1.4.4 Baterías de Polímero de Litio

La batería de polímero de Litio (LiPo) data de los años 70, y se diferencia del resto de baterías por el electrolito utilizado. Éste, consiste en un polímero sólido de textura grumosa, en lugar del electrolito líquido de las baterías Ion-Litio. El material puede estar constituido por distintos compuestos, pero la tendencia actual es que su construcción esté basada en una matriz polimérica con sales de Litio rellenando los intersticios de la estructura atómica, por lo que se considera una batería de estado sólido.

El funcionamiento de esta batería se basa en la relación del metal de Litio ionizado, el cual se encuentra separado en dos cámaras teniendo en medio un tabique poroso, de gel con densidad y composición variable. De esta forma se mantiene una diferencia de potencial gracias a la energía de ionización aplicada durante el proceso de carga.

Cada celda se compone por:

- Un ánodo de Litio metálico con forma de lámina ultradelgada, que realizará la función de emisor y colector de iones de litio (según carga o descarga, respectivamente).
- Un cátodo formado por capas intercaladas de óxido de Vanadio, sal de Litio y un polímero conductor (laminados sobre una hoja de aluminio)
- El electrolito, que es un sólido de textura gomosa al que se añade un gel para mejorar sus propiedades térmicas, donde también se encuentra una membrana que sirve de separador entre las láminas del ánodo y el cátodo.

Sus parámetros elèctricos más característicos sen encuentran en la siguiente tabla:

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Ánodo                        | Litio Metálico                            |
| Cátodo                       | Óxido de Vanadio, sal de litio y polímero |
| Electrolito                  | Polímero sólido con gel                   |
| Energía específica           | 130 - 200 Wh/kg                           |
| Potencia específica          | 420 W/kg                                  |
| Densidad energética          | 300 Wh/l                                  |
| Eficiencia en carga/descarga | 99%                                       |
| Velocidad de autodescarga    | 5% mensual                                |
| Durabilidad                  | Más de 1.000 ciclos                       |

Tabla 5.4: Características de las baterías LiPo

Entre sus propiedades, también se ha de destacar que no sufren el “efecto memoria” y que el material del electrolito dota a la batería de una alta densidad energética. Su mantenimiento es reducido y el porcentaje de autodescarga, insignificante. Además, son capaces de generar voltaje muy elevados, dado que la tensión de cada celda puede alcanzar los 3,6 V. Otra ventaja es que el empaquetado de la batería puede tener múltiples formas, lo que le otorga versatilidad física a la hora de acoplarse a su aplicación.

Sin embargo, también presentan diversas desventajas, como su temperatura de funcionamiento, que varía entre los 60 y los 120 °C debido a la baja conductividad iónica de los polímeros a temperatura ambiente. Esto tiene una gran relevancia para el correcto y óptimo funcionamiento de este tipo de baterías, por lo que se ha de tener un control muy preciso de la temperatura, ya que, si se produce una sobrecarga excesiva, puede existir riesgo de incendio.

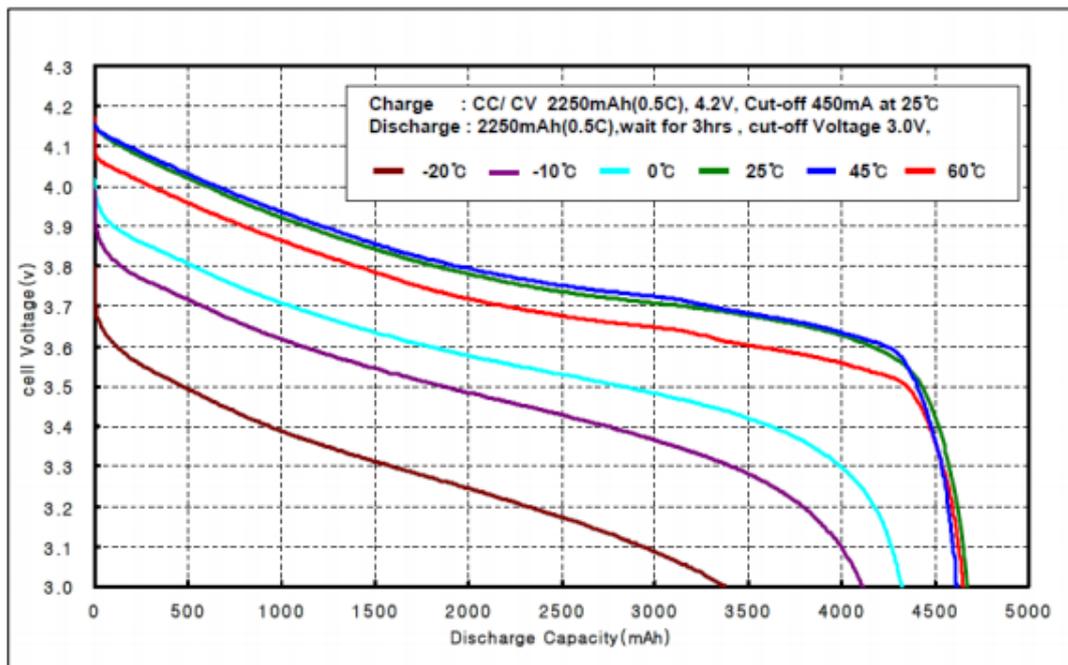


Figura 5.9: Curvas de descarga de baterías LiPo a distintas temperaturas

El primer fabricante que ha empezado a equipar en sus vehículos este tipo de baterías ha sido Hyundai, en su modelo puro eléctrico Hyundai Ioniq. A éste le han seguido otras grandes firmas como Kia.

#### 5.1.4.4 Baterías Zebra o de sal fundida

Las baterías Zebra (Zeolite Battery Research África Project) son baterías cuyo funcionamiento se produce a elevada temperatura (aproximadamente 300 °C) por lo que la temperatura exterior no tiene demasiada influencia en las prestaciones de la batería. Sin embargo, para poder mantener esta temperatura, es necesario que la batería venga montada sobre una caja que sirva de aislante con la temperatura exterior.

Para utilizar la batería es necesario que sea calentada, empleando para ello la energía eléctrica, lo que supone un consumo de energía extra. En ella, el cátodo está formado por Níquel (Ni), el ánodo por Sodio (Na) y el electrolito por Cloroaluminato de sodio.

Estas baterías han sido empleadas en algunos modelos de automóviles, autobuses, camiones e incluso trenes, obteniendo buenos resultados gracias a la posibilidad de trabajar con voltajes realmente elevados (próximos a los 600 V).

Su principal ventaja es el precio. Son unas baterías muy económicas comparado con las de Ion-Litio pese a que poseen una energía específica de 125 Wh/kg y una vida útil de 2.000 ciclos de carga/descarga.

En cuanto a los inconvenientes, es evidente. Tienen una temperatura de funcionamiento muy elevada, factor muy relevante, que supone un problema.

## 5.2 Sistema de gesti3n de Baterias (BMS)

El gran desarrollo producido en los dispositivos electr3nicos en los 3ltimos a3os ha generado la necesidad de incorporar sistemas de almacenamiento de energa con mayores prestaciones. Por eso, pr3cticamente todas las baterias que se encuentran en los dispositivos electr3nicos con un m3nimo de exigencia est3n acompa3adas de un Sistema de Gesti3n de Baterias (BMS).

El BMS (de ls siglas en ingles correspondientes a *Battery Management System*) es un dispositivo electr3nico que gestiona un bateria o celda recargable. Este elemento es especialmente importante en las baterias formadas por un gran n3mero de celdas y sobre todo en las baterias de Litio, ya que presentan el inconveniente de que tienen facilidad de salirse de la zona de funcionamiento seguro (*Safe Operating Area, SOA*), lo que reduce significativamente su vida 3til.

Este dispositivo es el responsable de monitorizar los par3metros m3s relevantes de las baterias y, mediante el uso de un algoritmo que los relaciona, realiza las funciones necesarias para que el funcionamiento de la bateria se encuentre dentro de unos est3ndares que se consideran adecuados y seguros, a la vez que otorga toda la informaci3n que permite conocer el estado de la bateria.

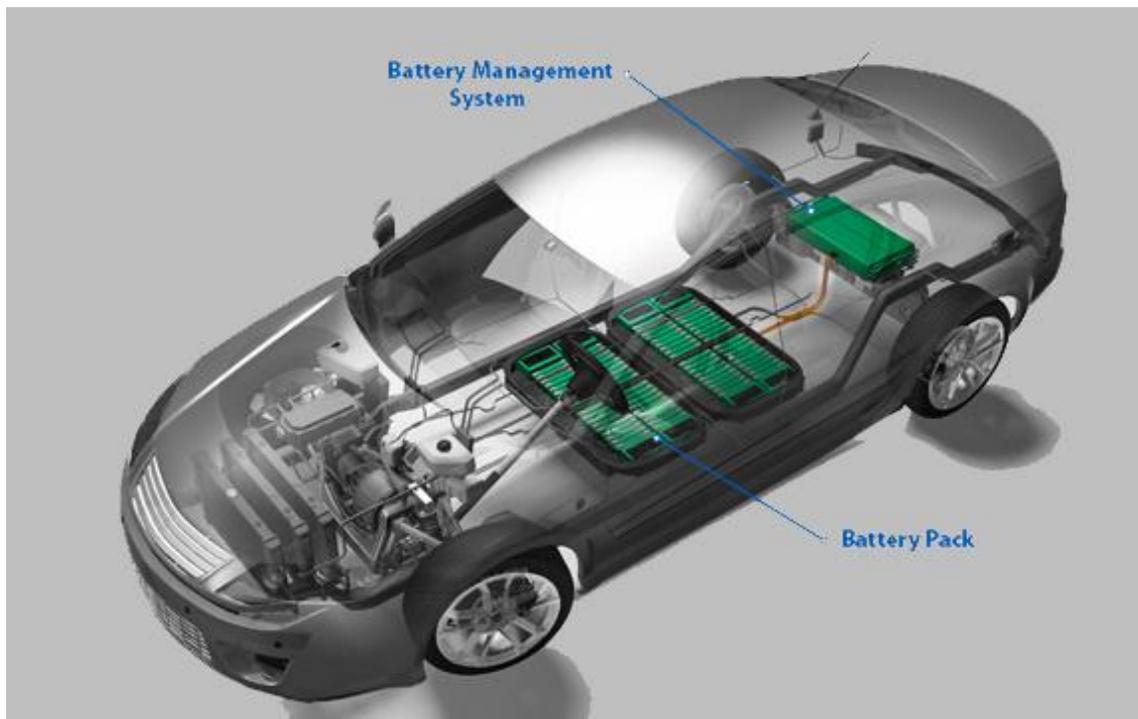


Figura 5.10: Ejemplo de disposici3n del dispositivo BMS

Las **principales funciones** que realiza el BMS para asegurar el correcto desempeño de la batería son:

- Determinación del estado de la batería.
- Control de la carga y descarga de la batería.
- Establecer un equilibrio de tensión en todas las celdas.
- Gestión térmica.
- Gestión de seguridad.
- Comunicación con la interfaz del usuario.

Y con estas funciones, persigue lograr los siguientes **objetivos**:

- Proteger las celdas y módulos de posibles daños eléctricos.
- Situar el estado de la batería en el punto de óptimo funcionamiento.
- Prolongar la vida útil de la batería.
- Cargar y descargar las celdas de la batería de manera uniforme.

Las baterías actuales de los vehículos híbridos y eléctricos presentan tensiones nominales de 200 a 800 V y corrientes de hasta 1 kA, lo que supone un grave peligro si se produce un defecto de aislamiento. Para evitar fugas en el chasis del vehículo, los BMS implementados para este tipo de aplicaciones incorporan un bloque de actuación el cual, en caso de detectar un defecto eléctrico, activa los protocolos de seguridad correspondientes.

El funcionamiento de una batería de alto voltaje y alta potencia en automóviles, fuera de sus límites de diseño especificados, conducirá a la producción de daños irreversibles en la batería. Estos daños pueden llegar al caso de tener que reemplazar la misma. Es por ello que, el BMS se encarga de generar una respuesta adecuada ante posibles parámetros dañinos, como por ejemplo: temperatura del ambiente baja o elevada, protección frente a cortocircuitos, tensión superior a la recomendada durante la recarga, tensión inferior a la recomendada durante la descarga, sobrecalentamiento de la batería, etc.

Otra de las funciones del BMS es determinar el SOC (*State of Charge*, estado de carga) y el SOH (*State of Health*, estado de salud) de las baterías. Estos parámetros reflejan las condiciones de autonomía, estado individual de cada celda y las condiciones físicas e internas de la batería.

## 5.3 Motor Eléctrico

### 5.3.1 Introducción

Los motores eléctricos son dispositivos electromecánicos rotativos que, mediante un campo magnético, convierten la energía eléctrica en energía mecánica de rotación. Estos elementos generan la potencia de propulsión necesaria para impulsar al vehículo. Sin embargo, también funcionan como generadores, puesto que esta conversión de energía es reversible. Es decir, que pueden aprovechar la energía mecánica que emplea el vehículo en su movimiento para generar energía eléctrica y poder cargar la batería.

Los motores eléctricos se hallan formados por varios elementos, sin embargo, los más importantes son: el estator, la carcasa, la base, el rotor, la caja de conexiones, las tapas y los cojinetes. No obstante, un motor puede funcionar únicamente con el estator (parte fija del motor) y el rotor (parte móvil del motor).

Tradicionalmente, debido a la madurez de su tecnología, los motores eléctricos de propulsión más empleados en la industria del automóvil han sido los motores de corriente continua. Estos motores tienen una enorme flexibilidad en el control de las prestaciones que proporciona en cada momento, sin embargo, requieren un frecuente mantenimiento.

En estos últimos años, dada la evolución de la electrónica de potencia, se han logrado implementar complejas estrategias de control sobre los motores de inducción (de corriente alterna), por lo que, en la actualidad, lo más común en los vehículos híbridos y eléctricos, es que lleven incorporado este tipo de motor. Los motores de inducción poseen mayor potencia que los de corriente continua y requieren de menos mantenimiento. Sin embargo, su control de la velocidad es mucho más complejo.

La investigación sobre la tecnología de motores eléctricos no se ha frenado. Eso conlleva el desarrollo de nuevos tipos de motores eléctricos como por ejemplo los de reluctancia variable o sincrónicos.

Las ventajas generales que presenta el motor eléctrico son:

- No quema combustible durante su uso.
- No emite gases contaminantes a la atmósfera.
- Es más compacto, barato y más simple que los motores de combustión interna.
- Presenta un mantenimiento reducido.
- Es silencioso y tiene pocas vibraciones.
- Tiene mucha vida útil.
- No necesita cambio de marchas.
- Desarrolla el par máximo desde bajas revoluciones.
- La eficiencia del motor es muy elevada, situada alrededor del 90%
- Tiene la posibilidad de funcionar como generador.

Las principales desventajas de los vehículos propulsados por motor eléctrico son:

- Menor autonomía.
- Necesidad de ampliar la infraestructura eléctrica.

- Tiempo de recarga.

### 5.3.2 Fundamentos de operación

Como hemos dicho, un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas.

En magnetismo se conoce la existencia de dos polos: polo norte (N) y polo sur (S), que son las regiones donde se concentran las líneas de fuerza de un imán. Un motor se vale de las fuerzas de atracción y repulsión existentes entre los polos para poder funcionar. De acuerdo con esto, todo motor tiene que estar formado con polos alternados entre el estator y el rotor, ya que los polos magnéticos iguales se repelen y los polos magnéticos diferentes se atraen, produciendo así el movimiento de rotación. En la figura se muestra cómo se produce el movimiento de rotación en un motor eléctrico.

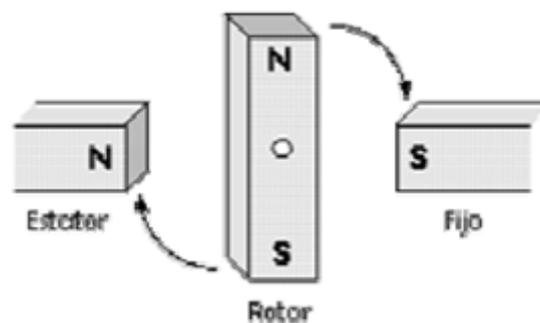


Figura 5.11: Movimiento de rotación en motores eléctricos

Un motor eléctrico opera primordialmente en base a dos principios. El principio de inducción, descubierto por Michael Faraday en 1831; que señala que si un conductor se mueve a través de un campo magnético o está situado en las proximidades de otro conductor por el que circula una corriente de intensidad variable, se induce una corriente eléctrica en el primer conductor. Y el principio que André Ampere observó en 1820, en el que establece que, si una corriente pasa a través de un conductor situado en el interior de un campo magnético, éste ejerce una fuerza mecánica o f. e. m. (fuerza electromotriz) sobre el conductor.

Ley de inducción electromagnética de Faraday:

$$\oint E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int B \cdot dS$$

Donde:

$E$  es el campo eléctrico.

$dl$  es el elemento infinitesimal de longitud del circuito.

$B$  es el campo magnético.

$S$  es una superficie arbitraria.

### 5.3.3 Partes fundamentales del motor eléctrico

Como hemos mencionado antes, para que un motor eléctrico funcione sólo se necesitaría un estator y un rotor, sin embargo, también hay elementos que caracterizan a estas máquinas, que se incluirían según su tipología. Los elementos característicos fundamentales de los motores eléctricos son:

#### **Estator:**

Elemento que opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor. El estator no se mueve mecánicamente, pero sí magnéticamente. Existen dos tipos de estatores:

- Estator de polos salientes.
- Estator ranurado

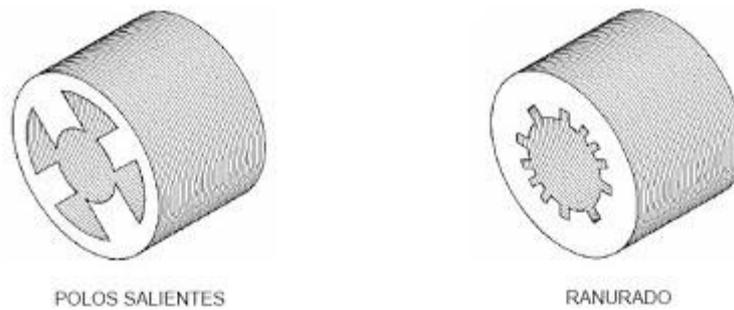


Figura 5.12: Tipos de Estatores

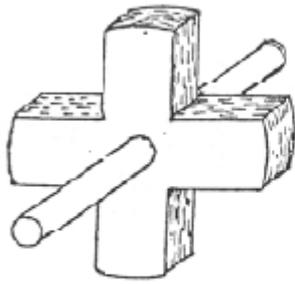
El estator está constituido principalmente de un conjunto de láminas de acero al silicio (y se les llama “paquete”), que tienen la habilidad de permitir que pase a través de ellas el flujo magnético con facilidad; la parte metálica del estator y los devanados proveen los polos magnéticos.

Los polos de un motor siempre son pares (2,4,6,8 ...), por ello el mínimo de polos que puede tener un motor para funcionar es dos (un norte y un sur)

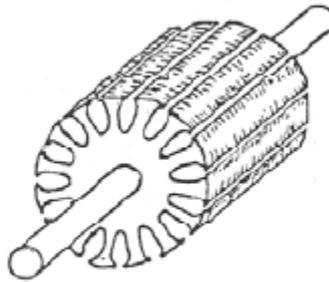
#### **Rotor:**

El rotor es el elemento de transferencia mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica. Los rotores pueden ser básicamente de tres tipos:

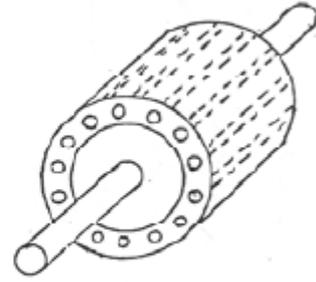
- Rotor ranurado
- Rotor de polos salientes
- Rotor de jaula de ardilla



Polos salientes



Ranurado



Jaula de ardilla

Figura 5.13: Tipos de Rotores

### **Carcasa:**

La carcasa es la parte que protege y cubre al estator y al rotor. El material empleado para su fabricación depende del tipo de motor, de su diseño y de su aplicación. Así pues, la carcasa puede ser:

- Totalmente cerrada.
- Abierta.
- A prueba de goteo.
- A prueba de explosiones.
- De tipo sumergible

### **Base:**

La base es el elemento donde se soporta toda la fuerza mecánica de operación del motor. Puede ser de dos tipos:

- Base frontal
- Base lateral

### **Caja de conexiones:**

Por lo general, en la mayoría de los casos los motores eléctricos cuentan con caja de conexiones. La caja de conexiones es un elemento que protege a los conductores que alimentan al motor, resguardándolos de la operación mecánica del mismo, y contra cualquier elemento que pudiera dañarlos.

### **Tapas:**

Son los elementos que van a sostener en la gran mayoría de los casos a los cojinetes o rodamientos que soportan la acción del rotor.

### Cojinetes:

También conocidos como rodamientos. Contribuyen a la óptima operación de las partes giratorias del motor. Se utilizan para sostener y fijar ejes mecánicos y para reducir la fricción. Esto contribuye a lograr que se consuma menos potencia. Los cojinetes pueden dividirse en dos clases generales:

- Cojinetes de deslizamiento: Operan en base al principio de la película de aceite, esto es, que existe una delgada capa de lubricante entre la barra del eje y la superficie de apoyo.



Figura 5.14: Cojinete de deslizamiento

- Cojinetes de rodamiento: Se utilizan con preferencia a los anteriores por varias razones; tienen un menor coeficiente de fricción, especialmente en el arranque; son compactos en su diseño; tienen una alta precisión de operación; no se desgastan tanto como los anteriores y se remplazan fácilmente dado sus tamaños estándares.



Figura 5.15: Cojinete de rodamiento

### 5.3.4 Tipologías del motor eléctrico

La principal diferencia y clasificación de los motores eléctricos se hace en función del tipo de corriente de alimentación. Esta alimentación puede ser corriente continua (CC) o corriente alterna (AC).

En la siguiente figura se disponen y clasifican las tipologías de motores eléctricos desarrolladas hasta el momento:

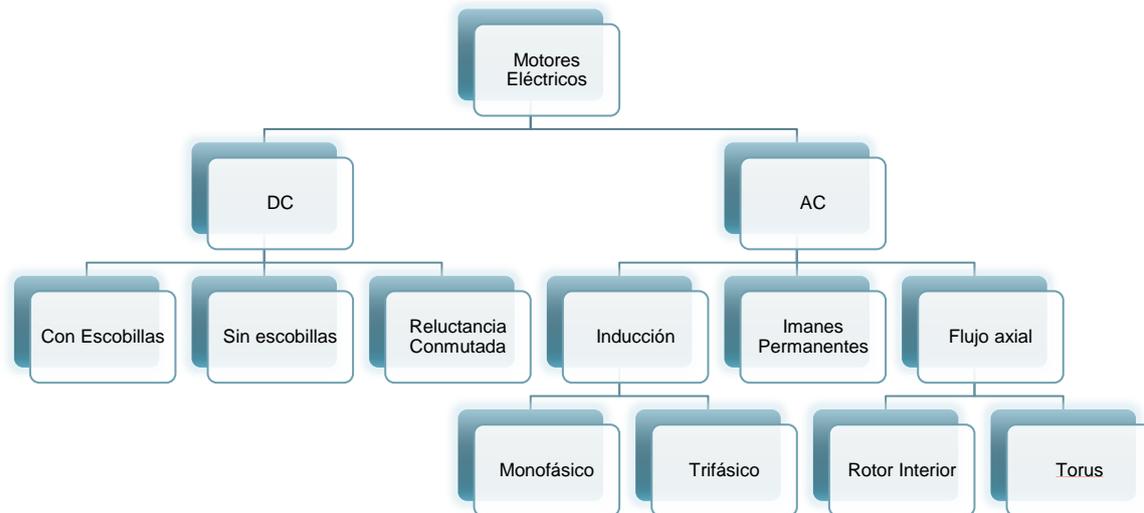


Figura 5.16: Clasificación de los motores eléctricos

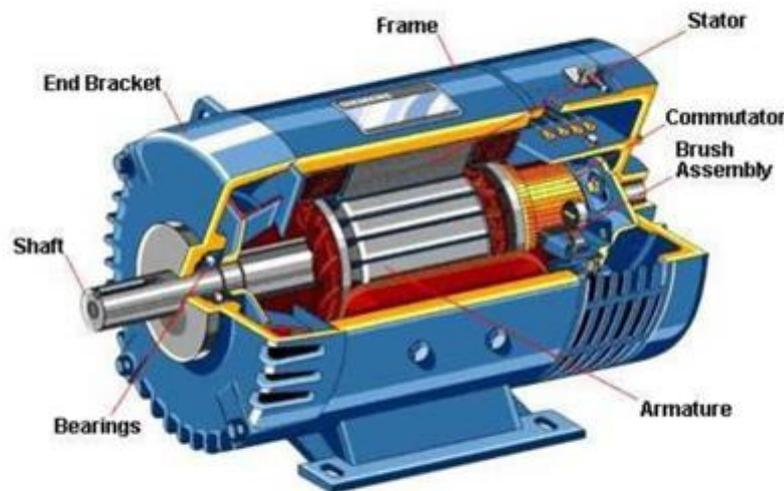
#### 5.3.4.1 Motor de corriente continua sin escobillas (Brushless)

Estos motores tienen la característica de que no emplean escobillas en la conmutación para la transferencia de energía; en este caso, la conmutación se realiza electrónicamente. Esta propiedad elimina el gran problema que poseen los motores eléctricos de corriente continua convencionales con escobillas, los cuales producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor, son ruidosos y requieren una sustitución periódica y, por tanto, un mayor mantenimiento.

La innovación en los motores sin escobillas está en incluir en el rotor, dos o más imanes permanentes (en el motor con escobillas, estos imanes se encontraban en el estator) y los bobinados de hilo conductor en el estator. La corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator, generando un campo magnético de corriente continua. Este campo magnético interactúa con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, produciendo un par de giro en el rotor y por lo tanto en el eje del motor. A medida que el rotor gira, es necesario que la polaridad de las corrientes del estator varíe continuamente de tal forma que el par de torsión permanezca constante y la conversión de energía mecánica a energía eléctrica sea lo más eficiente posible. Este control sobre la corriente lo realiza el inversor.

En los motores Brushless, cuando se solicita un par máximo, especialmente a bajas velocidades, la fuerza del campo magnético debe ser máxima, para conseguir que las corrientes del inversor y del motor tengan unos valores lo más bajo posibles. De igual manera, cuando el par requerido tenga un valor bajo, el campo magnético debe ser reducido de tal forma que las pérdidas en la corriente debido a la histéresis también se reduzcan.

Su funcionamiento es muy parecido al del motor síncrono de imanes permanentes, pero con la diferencia de que el sistema electrónico es considerado parte del motor.



## *DC Motor Breakdown*

Figura 5.17: Componentes de un motor DC Brushless

Entre las principales ventajas de este tipo de motor, se destaca la sencillez del control de la velocidad y buenas características potencia/par. Por el contrario, su eficiencia no es demasiado alta y su coste de fabricación es elevado.

En contraste, los motores de inducción no tienen imanes permanentes y por tanto, no tienen un campo magnético constante, sino que se ajusta en proporción a la relación tensión/frecuencia. De esta forma se puede conseguir una eficiencia superior. Este es el motivo por el que los motores Brushless están siendo sustituidos por los de corriente alterna en la mayoría de las marcas del sector.

Además, dentro de esta categoría de motores, podemos encontrar diferencias según la forma de conexión de las bobinas inductoras e inducidas entre sí. Pero antes de hacer esta segunda clasificación, debemos aclarar un concepto básico: el concepto de funcionamiento con carga y funcionamiento en vacío.

Un motor funciona con carga cuando está arrastrando cualquier objeto o soportando cualquier resistencia externa (carga) que lo obliga a absorber energía mecánica.

Un motor funciona en vacío cuando el motor no está arrastrando ningún objeto, ni soportando ninguna resistencia externa. El eje gira libremente sin estar conectado a nada. En este caso, el par resistente se debe únicamente a factores internos.

Procedemos ahora a la clasificación:

### **Motor de excitación independiente:**

Son aquellos que obtienen la alimentación del rotor y del estator de dos fuentes de tensión independientes. Con ello, el campo del estator es constante al no depender de la carga del motor, y el par de fuerzas es entonces prácticamente constante. Este sistema de excitación no se suele utilizar debido al inconveniente que presenta el tener que utilizar una fuente de corriente exterior.



Figura 5.18: Esquema de motor CC excitación independiente

### **Motor de excitación en serie:**

Los devanados del inducido y el inductor están colocados en serie y alimentados por una misma fuente de tensión. En este tipo de motores existe dependencia entre par y velocidad; son los motores en los que, al aumentar la corriente de excitación, se hace disminuir la velocidad, con un aumento del par.

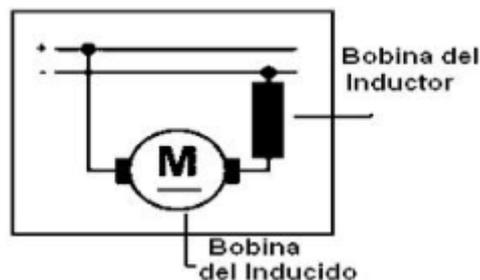


Figura 5.19: Esquema de motor CC excitación en serie

### Motor de derivación o excitación en paralelo:

El devanado del inducido e inductor están conectados en paralelo y alimentados por una fuente común. También se denominan máquinas shunt, y en ellas, un aumento de la tensión en el inducido hace aumentar la velocidad de la máquina.



Figura 5.20: Esquema de motor CC excitación en paralelo

### Motor compuesto:

También llamados *compound*. En este caso el devanado de excitación tiene una parte de él en serie con el inducido y otra parte en paralelo. El arrollamiento en serie con el inducido está constituido por pocas espiras de gran sección, mientras que el otro está formado por un gran número de espiras de pequeña sección. Permite, por tanto, obtener un motor con las ventajas de la excitación en serie, pero sin sus inconvenientes. Sus curvas características serán intermedias entre las que se obtienen con excitación en serie y en paralelo.

Existen dos formas de excitación compuesta. En la llamada *compuesta adicional* el sentido de la corriente que recorre los arrollamientos serie y paralelo es el mismo, por lo que sus efectos se suman. Por el contrario, en la *compuesta diferencial* el sentido de la corriente que circula por los arrollamientos tiene sentido contrario y por tanto, los efectos de ambos devanados se restan.

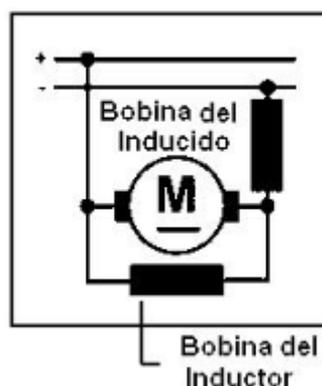


Figura 5.21: Esquema de motor CC excitación *compound*

### 5.3.4.2 Motor asncronos o de inducci3n

Los motores asncronos trifásicos pueden incluirse entre las máquinas eléctricas más fiables que existen; desarrollan su funci3n durante muchos años con intervenciones de mantenimiento muy reducidas y se adaptan a distintas prestaciones en funci3n de las exigencias, cubriendo tanto aplicaciones de producci3n como de servicio.

Estos motores se utilizan en los sectores industriales más variados. Su uso com3n consiste en emplearlos como bombas o compresores. Este tipo de motor puede considerarse como la máquina eléctrica más ampliamente utilizada en el entorno industrial ya que aproximadamente el 75% del consumo eléctrico del sector se centra únicamente en la alimentaci3n de estos motores.

Estos motores est3n formados por el estator y el rotor. El estator del motor de inducci3n trifásico es pr3cticamente idéntico al del motor de corriente continua sin escobillas. Se trata de un anillo cilíndrico con chapas magnéticas donde se encuentran tres conjuntos de bobinas o devanados desfasados 120°. El rotor, a diferencia del motor de CC, no tiene imanes. En su lugar, contiene un conjunto de láminas de metal apiladas formando un cilindro con ranuras, en las cuales se coloca el devanado. Utilizan dos tipos de rotores, en funci3n de la disposici3n que tengan los conductores:

- **Rotor de jaula de ardilla:** Formado por dos anillos laterales unidos por una serie de conductores de aluminio o cobre.



Figura 5.22: Rotor de Jaula de Ardilla

- **Rotor bobinado o con anillos:** Dispone de un arrollamiento similar al del estator, en el que las tres fases se conectan por un lado en estrella y por el otro a unos anillos que se encuentran aislados entre sí. Esta disposici3n permite introducir resistencias en los anillos para limitar las corrientes y controlar el par y la velocidad.

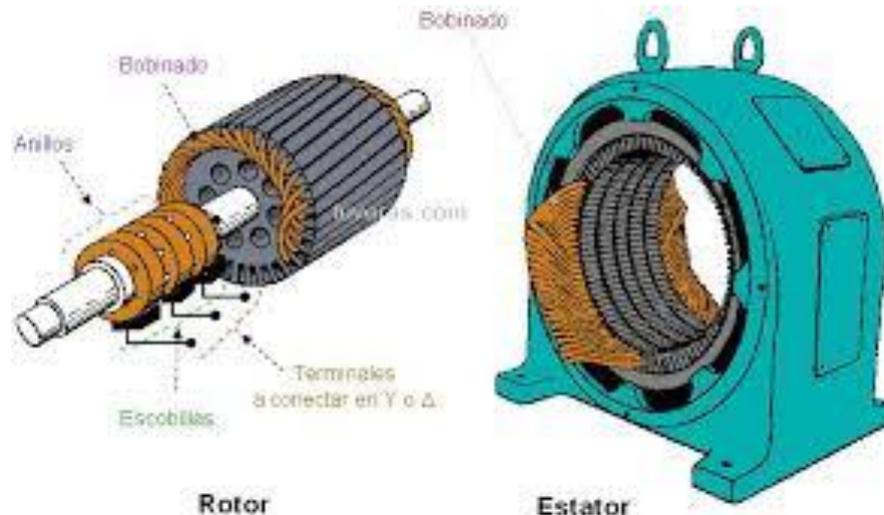


Figura 5.23: Rotor Bobinado y Estator

Las corrientes que fluyen en los devanados del estator producen un campo magnético giratorio que entra en el rotor. La tensión eléctrica inducida en el rotor junto con el campo magnético generado por las bobinas del estator produce el movimiento del rotor. Pero el rotor nunca conseguirá alinearse completamente con el campo magnético creado por las bobinas, quedando siempre desfasado respecto a estas, de ahí que se le llame motor asíncrono.

La relación que hay entre la velocidad del rotor y la del campo magnético (velocidad de sincronismo) se llama deslizamiento. Es habitual que este parámetro se simbolice con la letra "s". De esta forma:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

Siendo "s" el deslizamiento;  $\omega_s$ , la velocidad de sincronismo y  $\omega$  la velocidad del rotor. Es importante observar que cuando la velocidad del rotor sea nula, el deslizamiento será máximo ( $s=1$ ). Por el contrario, si el rotor girara a la velocidad de sincronismo (no pasa en los motores de inducción), el deslizamiento sería igual a 0.

Los principales parámetros de este motor son:

- **Potencia:** medida en kilovatios (kW), que representa la potencia mecánica nominal disponible en el eje. Es frecuente expresarla también en caballos de vapor (CV).
- **Tensión de alimentación:** medida en voltios (V) también llamada voltaje o diferencia de potencial, existente entre dos puntos, que indica el trabajo necesario para desplazar una carga positiva de un punto a otro. Los más empleados son 127, 220, 380, 440, 2300 y 6000 V.
- **Intensidad nominal:** asociada a la potencia y a la tensión a través de los parámetros de rendimiento ( $\eta$ ) y factor de potencia nominal ( $\cos(\varphi)$ ).
- **Velocidad de rotación:** medida en revoluciones por minuto (rpm) o radianes por segundo (rad/s). Relativa a la frecuencia (50 o 60 Hz).

- **Tipo de servicio:** debe de ser especificado por el usuario del motor (clasificaciones proporcionadas por la norma IEC 60034-1 “*Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características nominales y características de funcionamiento*”). Si no se especifica el tipo de servicio, el motor se considerará de servicio S1, es decir, idóneo para el servicio continuo.
- **Grado de protección:** clasificación IP que proporciona información sobre la protección contra el acercamiento o contacto con partes bajo tensión, contra el contacto con partes en movimiento dentro de la envolvente y la protección de la máquina contra la introducción de cuerpos sólidos extraños (prescripciones y clasificación según la norma IEC 60034-5 “*Grados de protección proporcionados por el diseño integral de las máquinas rotativas*”).
- **Clase térmica:** que indica el límite de temperatura admitido por los devanados del motor. Se expresa a través de clases de aislamiento identificadas con letras.
- **Código IC:** designación relativa al método de enfriamiento compuesto por cifras y letras que representan la disposición del circuito, el líquido de refrigeración y el método de circulación de dicho líquido.
- **Código IM:** indicación relativa a la clasificación de los tipos de construcción y las disposiciones de montaje de las máquinas eléctricas rotativas.

El uso de estos motores en la industria es tan amplio debido a que un motor de inducción de tres fases conectado a la red eléctrica convencional (CA) produce par desde el principio, sin necesidad de convertir la corriente mediante un inversor. Pero en cuanto a los vehículos eléctricos, la energía eléctrica almacenada en las baterías se encuentra en forma de corriente continua (CC), siendo necesario el uso de un inversor para obtener corriente alterna (CA) como alimentación del motor.

A parte de la limitación que supone el empleo de la corriente alterna como alimentación, estos motores tienen grandes ventajas respecto a los motores de corriente continua. Entre ellas destacan: buena robustez mecánica y térmica, requieren poco mantenimiento, buen control sobre la velocidad y par, son más económicos y fiables y tienen una alta eficiencia a potencias elevadas.

En cuanto a sus desventajas, poseen una baja densidad de potencia y el rendimiento del par de arranque es bajo en comparación con los motores de corriente continua.

### 5.3.4.3 Motor síncrono de imanes permanentes

Los motores síncronos son máquinas cuyo estátor se encuentra alimentado por corriente alterna, mientras que el rotor tiene alimentación continua, ya sea a través de un bobinado de campo o mediante imanes permanentes. Se denominan síncronos porque el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético rotativo, según la *velocidad de sincronismo* ( $n$ ):

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ (rpm)}$$

Donde  $f$  es la frecuencia de la corriente alterna de alimentación en Hercios (Hz), y  $p$  es el número de pares de polos del motor.

En este tipo de motor, el estator está formado por tres bobinas desfasadas  $120^\circ$  entre sí. El rotor está compuesto por electroimanes o imanes permanentes, cuya función consiste en generar un flujo constante en el entrehierro (parte del motor situada entre rotor y estator), lo que permite suprimir las escobillas de otros modelos. Por los devanados del estator deben alimentarse con tensiones trifásicas simétricas, de manera que por las bobinas circulen intensidades simétricas y equilibradas.

En las máquinas de corriente alterna (CA) se utiliza una alimentación trifásica para aprovechar los desfases de onda y así poder generar campos magnéticos rotativos. En estos motores es imprescindible una colocación estratégica de los bobinados del estator y de los electroimanes del rotor. De ello depende la optimización de la interacción del campo magnético, creado por los imanes permanentes, con las corrientes que circulan por el interior de las bobinas, produciendo así un par de torsión entre rotor y estator. Mientras el rotor gira, es necesario que la polaridad del estator varíe continuamente, para mantener constante el par de torsión. En caso de que la máquina funcione como motor, el imán del rotor seguirá al estator, y cuando funcione como generador, el imán del estator perseguirá al rotor.

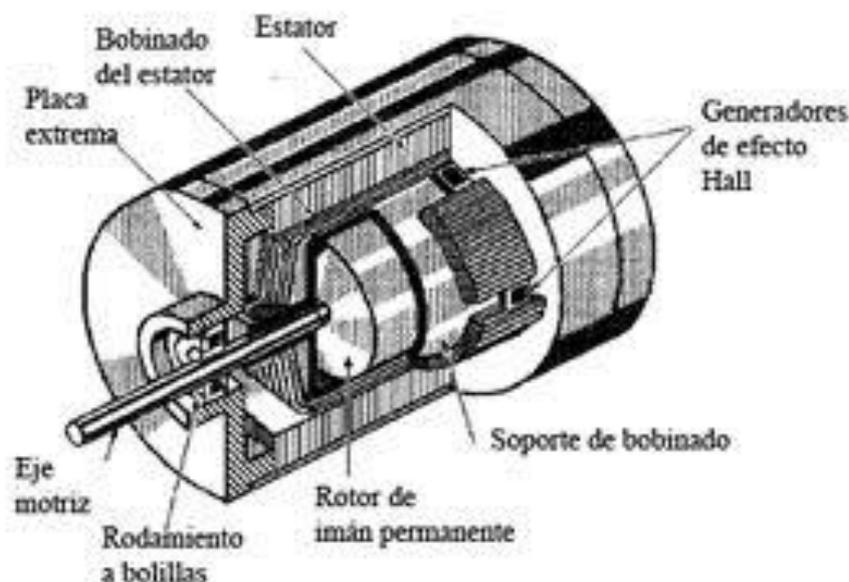


Figura 5.24: Partes de un Motor síncrono de imanes permanentes

El rotor de un motor síncrono de imanes permanentes puede estar conformado por:

- Rotor cilíndrico liso.
- Rotor de polos salientes
- Imán permanente

Dependiendo de la velocidad de giro, la potencia nominal y la construcción del motor, será más conveniente incorporar un tipo u otro de los rotores comentados.

En cuanto a la configuración, de estos tres tipos, el más simple es el de imanes permanentes, ya que evitan el uso de anillos rozantes para alimentar el rotor. Además, pueden funcionar a altas potencias gracias a los imanes de alta densidad energética.

Actualmente para la fabricación de los imanes permanentes se emplean aleaciones de tierras raras, como neodimio-hierro-boro (*NdFeB*) o samario-cobalto, ya que son capaces de crear un campo magnético mayor.

Hasta el momento, este tipo de motores ha sido el más utilizado en la industria del automóvil en los vehículos de propulsión híbrido o eléctrica. Esto es por su simplicidad de funcionamiento y su buena respuesta, que los convierte en motores ideales para esta aplicación.

Entre sus ventajas destacan la alta densidad de energía, el elevado par de arranque, bajo coste de mantenimiento, y su buen control de la velocidad y potencia constante en un amplio rango.

Sin embargo, su fabricación es costosa y, a elevadas velocidades, la eficiencia puede disminuir debido al riesgo de desmagnetización de los materiales.

Se prevé que tanto los motores de inducción como los de imanes permanentes continúen aumentando su presencia en los vehículos híbridos y eléctricos debido a sus buenas prestaciones y características.

#### 5.3.4.4 Motor sncrono de reluctancia conmutada o variable

El avance producido en la electrònica de potencia está permitiendo que el motor de reluctancia variable sea una alternativa interesante a los motores de corriente alterna explicados anteriormente, gracias a su sencillo funcionamiento, bajo coste y elevada eficiencia.

En ellos, tanto el estator como el rotor poseen una configuraci3n de polos salientes, careciendo de devanados o imanes permanentes en el rotor. Esto hace que exista cierta dificultad en su análisis y control. En los polos del estator se colocan las bobinas que, conectadas en los pares diametralmente opuestos, forman las fases del motor. Sin embargo, el rotor s3lo consta del eje y el conjunto de chapas que, como consecuencia, hace que este tipo de motores posean un momento de inercia muy pequeo.



Figura 5.25: Motor de reluctancia variable

El principio de funcionamiento del motor de reluctancia conmutado es fácilmente imaginable: Un eje de hierro que puede girar apoyado sobre unos rodamientos, o también los dientes de un rotor de hierro, se orientan en un campo magnético producido gracias a una corriente eléctrica en los polos del estátor. Mediante una determinada conmutaci3n del campo magnético se conseguir un movimiento rotatorio del núcleo de hierro. En el caso de que este rotor posea más dientes, se puede comparar su forma a la de una rueda dentada de gran espesor. El concepto "Reluctancia" se corresponde con la resistencia magnética, la cual opone dicho rotor al campo electromagnético. La generaci3n y posterior conmutaci3n del campo magnético se realiza en los bobinados de los polos de la parte fija de la máquina, a través de la electr3nica de potencia conectada al motor. Con "electr3nica de potencia" nos referimos al convertidor de corriente, así como al convertidor de frecuencia, que se pueden manejar para obtener tanto las revoluciones como el par de giro deseados.

La principal dificultad de estos motores es controlar la corriente. Pero, a excepci3n de esto, el rotor es mucho más simple, barato y resistente que los motores de inducci3n.

#### 4.3.4.5 Motor de flujo axial

En los motores de flujo axial, al variar la disposición de los devanados e imanes del rotor y del estator, se crea un flujo de campo magnético paralelo al eje del motor. La arquitectura de estos motores permite separar el estator en dos discos magnéticamente activos que van a ser los que induzcan la fuerza del campo magnético al rotor, el cual se encuentra situado entre los dos discos que forman el estator. De esta forma, las fuerzas axiales se contrarrestan y el momento de inercia se reduce.

Existen dos configuraciones en función de la disposición del rotor y el estator:

- Torus: dos rotores se sitúan alrededor de un estator fijo.
- El rotor se imanes permanentes situado entre los dos discos que forman el estator (configuración más usada).

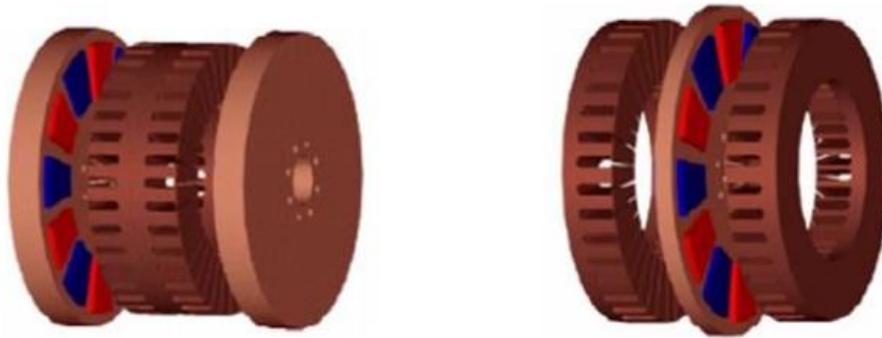


Figura 5.26: Configuración Torus y de Rotor Interior de los Motores de Flujo Axial

La principal ventaja de esta tecnología es la optimización del número de componentes que conforman el motor, por lo que su tamaño es muy reducido. Esto permite la implantación de estos motores en cada una de las ruedas del vehículo. Además, poseen una alta densidad de potencia y un elevado par a bajas velocidades.



Figura 5.27: Motor de flujo axial implementado en una rueda de vehículo eléctrico

## 5.4 Inversor

Normalmente cuando se habla de vehículos eléctricos se nombran con frecuencia los componentes fundamentales del mismo, entre los que siempre cogen protagonismo el motor eléctrico y sus características (rendimiento o entrega constante de par) y las baterías de alta tensión y sus limitaciones (peso, capacidad de almacenaje o elevado coste económico). Pero aparte de estos dos, hay un tercer elemento apenas reconocido que tiene también la relevancia suficiente como para destacarse. Hablamos del inversor.

El inversor y el transformador, que normalmente vienen situados en la misma caja integrada, son los componentes encargados de realizar las conversiones necesarias, adaptando la tensión almacenada en la batería y frecuencia de onda a los niveles adecuados, para suministrarlas al motor y así poder alcanzar el par y la velocidad deseados.

Tanto el par como la velocidad son proporcionales a la relación que hay entre la tensión y la frecuencia.

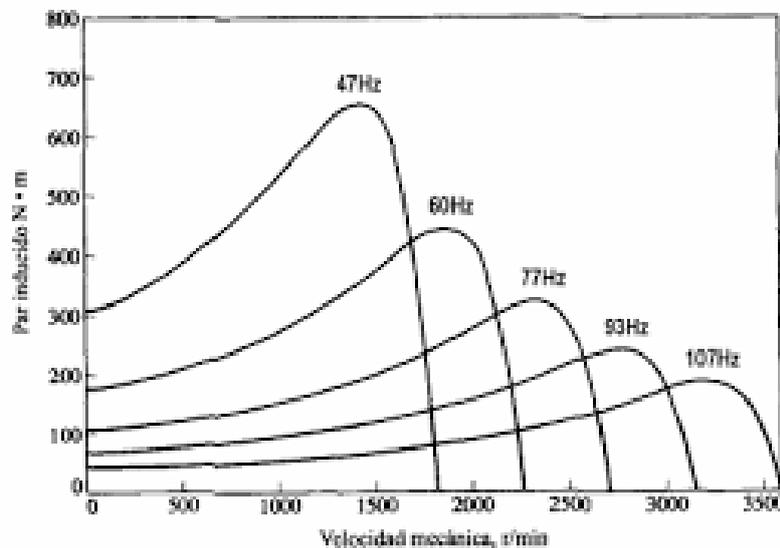


Figura 5.28: Control de velocidad mediante relación voltaje-frecuencia

Los inversores (también denominados onduladores) son convertidores estáticos de energía encargados de transformar la corriente continua de alta tensión almacenada en la batería en corriente alterna trifásica que servirá para impulsar el motor eléctrico. Las baterías entregan una determinada tensión constante, pero para conseguir que el motor funcione al régimen de revoluciones deseado, esta corriente debe ser adaptada por el inversor. Además, poseen un convertidor integrado, que envía parte de la electricidad del sistema a la batería auxiliar de 12 V. El transformador se encarga de armonizar los voltajes de la batería y el motor de tracción, ya que por lo general el motor trabaja a una tensión superior de lo que lo hace la batería (de baja tensión), por tanto, se hace necesario rectificar ambas: frecuencia de corriente y tensión.

La caja del inversor contiene los siguientes elementos en el mismo bloque:

- Transformador (para elevar la tensi3n).
- Inversor
- Conversor de CC/CC



Figura 5.29: Inversor marca Toyota

**Convertidor:** Cuando los motores elèctricos actúan como generadores, recuperando la energa producida durante la frenada, el inversor se encarga de convertir la corriente alterna (CA) que se produce en corriente continua (CC) para que pueda ser almacenada de nuevo en la batera de alta tensi3n. Para ello, el convertidor necesitará elevar la tensi3n nominal de CC a la tensi3n mÁxima de CC de trabajo.

**Inversor (convertidor CC/CA):** Cuando queremos impulsar al motor, la alta tensi3n de corriente continua generada en el convertidor es transformada en tensi3n de corriente alterna en el inversor, y ésta alimenta al motor elèctrico. Tambi3n realiza una funci3n rectificadora, es decir, durante el frenado regenerativo se realiza el proceso inverso, transformando corriente alterna en corriente continua. El funcionamiento del inversor estÁ basado en el uso de transistores bipolares. Éstos suelen ser de la familia MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) o IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), aunque las prestaciones que ofrecen los segundos son mayores al poder trabajar con tensiones y corrientes mayores (los MOSFET tienen estos parÁmetros bastante limitados).

**Conversor de CC/CC:** Encargado de transformar la tensi3n de corriente continua almacenada en la batera de alta tensi3n a baja tensi3n para alimentar y recargar la batera auxiliar de 12 V. Esta batera se encarga de proporcionar carga elèctrica a los sistemas elèctricos auxiliares del vehculo como por ejemplo las luces, elevalunas, etc.



Figura 5.30: Esquema de paso de corriente eléctrica por el tren de potencia

Al igual que sucede con las baterías y los motores, resulta esencial que el inversor tenga un elevado rendimiento para conseguir las máximas prestaciones sin generar pérdidas de energía durante las transformaciones. La materialización de esta pérdida energética se manifiesta a través de calor, por lo que también es necesario un buen sistema de ventilación y refrigeración para mantener una temperatura aceptable y evitar sobrecalentamientos y daños en el sistema. Por lo general, el rendimiento de este componente es superior al 95%.

## 5.5 Convertidor y Cargador Integrado

Para llevar a cabo la carga de la batería del vehículo, se necesitan ciertos componentes, tanto equipados en el propio vehículo como externos a él. El vehículo debe estar provisto de una conexión de carga y de un sistema electrónico de potencia que se encargue de realizar la transformación de la tensión. Los elementos exteriores serán la propia red eléctrica y un cable de carga con la conexión adecuada. Además, como se trabaja con tensiones elevadas, se necesita de varios dispositivos destinados al control y protección de los componentes implicados.

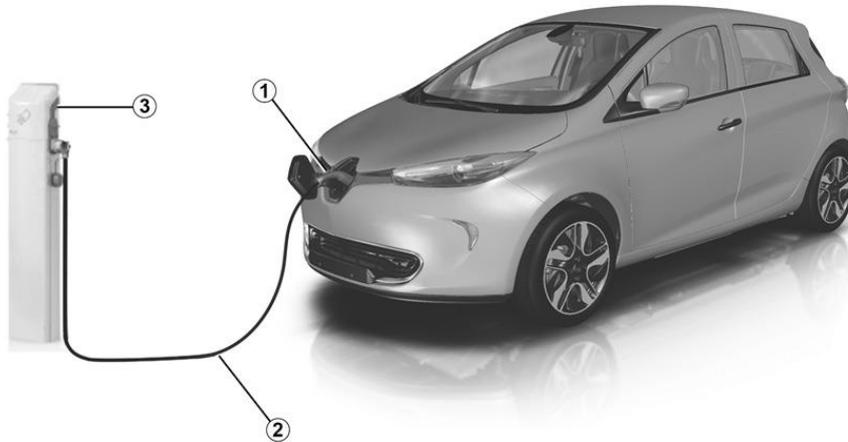
El **cargador integrado** es el elemento que toma la corriente alterna que viene directamente de la red eléctrica y los convierte en corriente continua para recargar la batería de alta tensión.

El **convertidor** aumenta o reduce la tensión transformada por el cargador para que pueda ser almacenada en las condiciones adecuadas en la batería de alta tensión. Funciona de la misma forma que el conversor CC/CC explicado anteriormente.

Se distinguen principalmente dos tipos de carga, pese a que hay más variantes. Hablamos de la recarga convencional y de la carga rápida. La diferencia fundamental se encuentra en el proceso de toma de electricidad. En el caso de los cargadores rápidos, la conexión se hace directamente a la batería y se toma energía en corriente continua. Esto supone tener una toma de corriente continua de alto voltaje. Por el contrario, la recarga convencional se realizaría a través de la toma de corriente de la red común e iría conectada al cargador interno del vehículo.

- Esquema de principio de la carga**
- 1 Toma de carga eléctrica
  - 2 Cable de carga
  - 3 Caja mural específica o terminal de recarga

35776



**Figura 5.31: Toma de recarga de batería de alta tensión en un vehículo**

En función de la forma de energía en la entrada y salida de un convertidor, se pueden clasificar como:

- **Rectificador no controlado:** Transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión constante.
- **Rectificador controlado:** Transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión variable mediante la utilización de trisiores, elementos que invierten el sentido de la corriente.
- **Reguladores de C.A.:** Transforman la corriente alterna de tensión constante en corriente alterna de tensión variable y de la misma frecuencia.
- **Cicloconvertidores:** Convertidores directos alterna/alterna que permiten variar la frecuencia, siendo siempre la frecuencia de salida inferior a la de entrada.
- **Ondulador o inversor:** Transforman una corriente continua en corriente alterna de tensión y frecuencia fija o variable.
- **Convertidor CC/CC o troceador:** Transforma la corriente continua de tensión constante en corriente continua de tensión fija o variable.

Todas estas transformaciones de corriente que son realizadas por los convertidores se basan en el mismo principio de funcionamiento: la utilización de semiconductores de potencia que funcionan como interruptores.

## 5.6 Reductor

La transmisión es la conexión que hay entre el motor y las ruedas de tracción. En el caso de los vehículos eléctricos, ésta se simplifica muy considerablemente. Esto es debido al alto par que ofrecen los motores eléctricos desde muy bajas revoluciones, lo que hace que la caja de transmisión convencional con más de una velocidad no sea necesaria. Por eso la mayoría de los fabricantes de vehículos eléctricos utilizan una única relación de velocidades, debido al amplio rango de revoluciones que es capaz de adquirir el motor eléctrico.

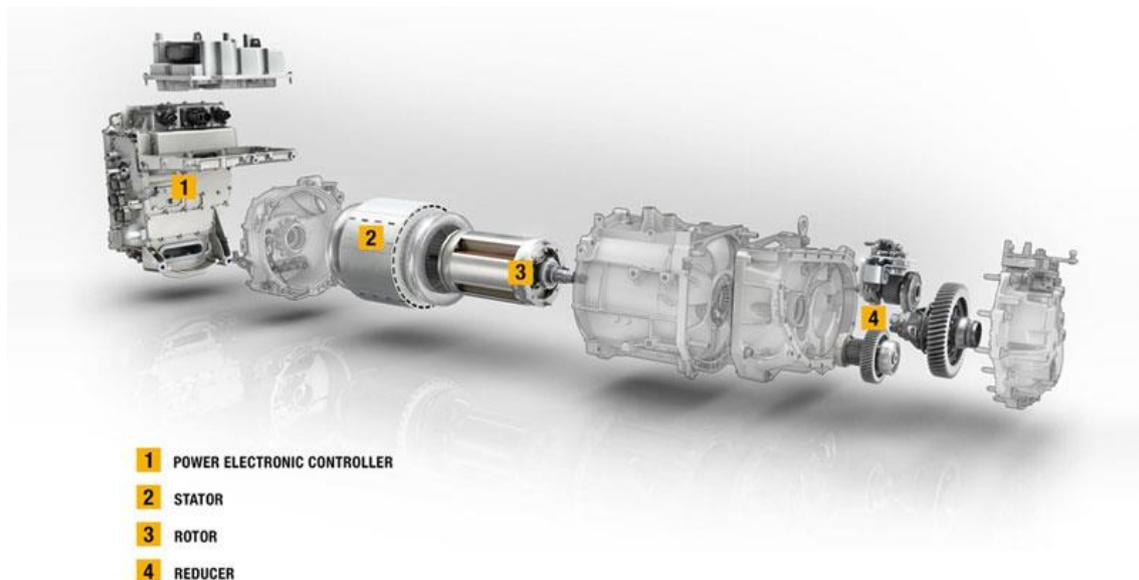


Figura 5.32: Esquema de la transmisión de un vehículo eléctrico

A pesar de la elevada eficiencia que tiene la transmisión de una única velocidad, se están desarrollando cajas de transmisiones automáticas de 2 y 3 velocidades con el fin de conseguir eficiencias superiores.

El reductor permite transmitir la energía mecánica del motor a las ruedas, aumentando el par y reduciendo la velocidad de rotación respecto del motor eléctrico. Estos están formados por sistemas de engranajes, cuya función es conseguir un equilibrio perfecto entre la velocidad y potencia transmitida en cada instante.

Con este sistema, se reducen las pérdidas energéticas al no haber tantos elementos mecánicos involucrados. Además, la instalación de este sistema requiere es más compacta, por lo que requiere menos espacio del habitual.

El reductor equivale a una caja de cambios de una única velocidad. En él, engrana el eje del motor eléctrico, reduciendo su velocidad de giro y repartiendo la potencia a los ejes de salida, que son los dos palieres que transmiten la fuerza de giro directamente a las ruedas. La marcha atrás se obtiene mediante la inversión del sentido de giro de la rotación del motor eléctrico.

## 6. Vehículos Híbridos

Según el Diccionario de la Real Academia Española (DRAE), “híbrido” es un adjetivo calificativo: “Dicho de una cosa: que es producto de elementos de distinta naturaleza”.

En el caso de los vehículos híbridos, centramos esa definición en dos elementos. El primero es la forma que va a tener el vehículo de almacenar energía y el segundo la forma que va a tener el vehículo de transformarla en energía mecánica. En este proyecto, nos referiremos a las dos naturalezas siguientes: la ya conocida tecnología de combustión y la tecnología eléctrica, para conformar ese producto que sería el vehículo híbrido.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> fruto del empleo de combustibles fósiles para la propulsión de vehículos que circulen por medio terrestre son una de las causas más evidentes y difíciles de controlar del cambio climático. A esto se añade el espectacular aumento del parque automovilístico en todo el mundo, lo que conlleva un mayor gasto de reservas de combustibles fósiles y otras fuentes de energía. Todo esto supone unas graves consecuencias medioambientales que obligan a plantear una serie de objetivos y limitaciones para conseguir cierto grado de bienestar económico y humano. Estas medidas se centran en la reducción de emisiones contaminantes y ruido, menor consumo de combustibles no renovables y un aumento de seguridad en el tráfico. Para ello, se pone de manifiesto desarrollar nuevas formas de transporte como son los vehículos eléctricos híbridos (HEV). Sin embargo, hasta que se consiga desarrollar un sistema eléctrico para vehículos idóneo, en el que se mejoran sus principales inconvenientes como son la autonomía o el tiempo de carga, una de las principales ideas de la investigación es acondicionar los motores térmicos para que cumplan con las exigencias sociales de la actualidad; por eso una solución a corto plazo son los vehículos híbridos.

Estos vehículos están concebidos como la transición de los vehículos convencionales a los vehículos eléctricos, ya que en ellos se logra una mayor eficiencia que en los térmicos, pero no son tan limpios como los eléctricos. Por lo tanto, se corrigen las principales limitaciones y problemas de cada tipo de vehículo. Pero no son ideales, ya que la tendencia es la electrificación total de la flota automovilística, y con ellos tan solo se puede ir educando a la sociedad para que vea con buenos ojos esta electrificación.



Figura 6.1: Logo de vehículos híbridos de Ford

## 6.1 Tipos de vehículos híbridos

Dentro del sector del vehículo eléctrico hay diversas clasificaciones de los vehículos híbridos. Esto es porque se basan en distintos criterios teóricos de clasificación como por ejemplo la clasificación que presentan sus componentes mecánicos, o el grado de hibridación eléctrica e incluso atendiendo al tipo de energía alternativa empleada.

Este proyecto se centra en la electrificación de los vehículos y, por tanto, en este apartado cabe la hibridación de naturaleza eléctrica. Se realizará una sola clasificación que pretende englobar todos los distintos criterios de clasificación para obtener un único criterio de distinción entre los vehículos híbridos.

Para ello, utilizaremos como base los grados de electrificación del vehículo describiendo la evolución del automóvil con motor de combustión interna al que se le añaden gradualmente los elementos eléctricos que conforman la transición que supone la hibridación de los vehículos para acabar terminando con los vehículos de tipología eléctrico puro.

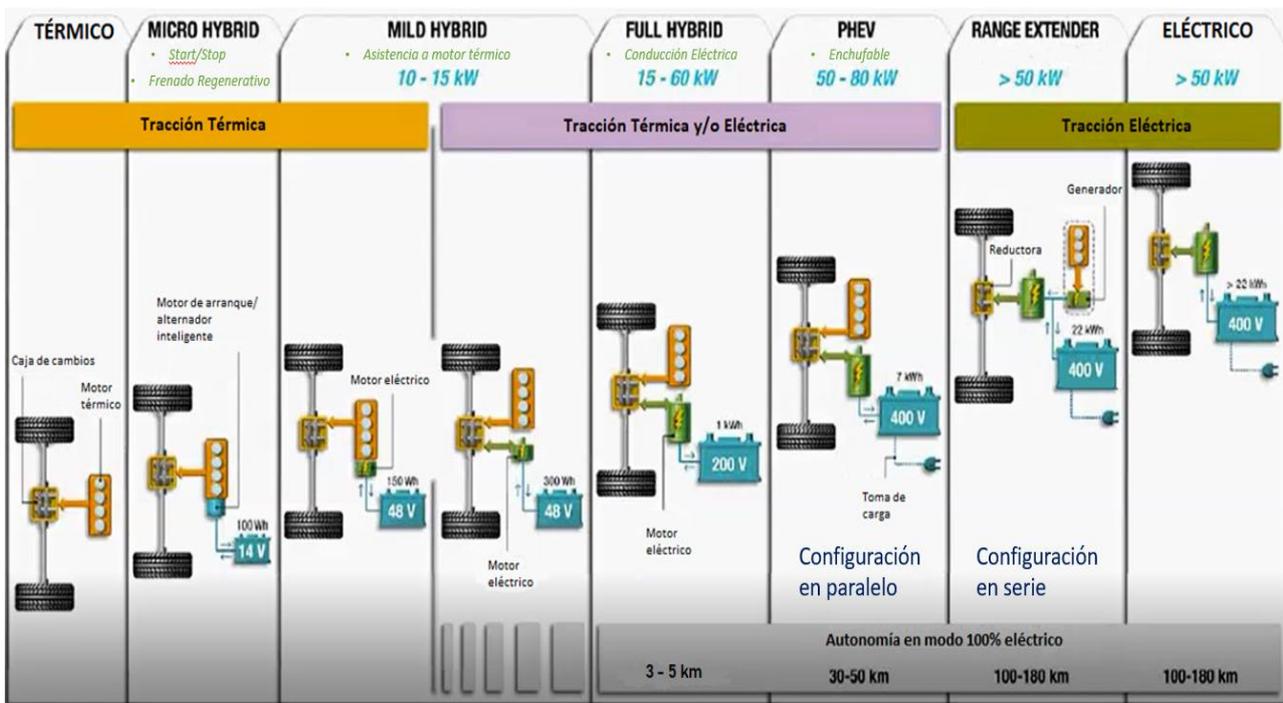


Figura 6.2: Grados de Electrificación del vehículo

### 6.1.1 Microhíbridos

Los vehículos microhíbridos se encuentran en la primera fase dentro de la electrificación del vehículo. Éstos van incorporando componentes o sistemas eléctricos que suponen un avance con respecto a los vehículos de motor de combustión interna, colaborando con emitir menos gases contaminantes a la atmósfera.

Sin embargo, estos vehículos aún no incorporan ninguna forma de tracción eléctrica, por lo que las baterías tienen características de 12 o 24 voltios y alrededor de unos 100 Wh.

Dentro de esta fase que suponen los microhíbridos, se incluyen los vehículos que presenten cualquiera de las siguientes 3 evoluciones, siendo estas acumulativas, es decir, los que presenten la tercera, también llevarán incorporadas las dos anteriores.

### **1. Introducción del sistema Start & Stop:**

Consiste en la automatización de los procesos de apagado y arranque del motor cuando las condiciones de conducción sean adecuadas. Las pruebas comparativas demuestran que los sistemas Start & Stop reducen hasta en un 5% las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de combustible según el ciclo europeo de conducción. En ciudad, se logra una reducción entre el 8% y el 15%.



Figura 6.3: Botón de sistema Start & Stop

### **2. Gestión de carga y frenado regenerativo**

Esta evolución consiste en dotar a los vehículos de un alternador inteligente que gestione la carga empleada en alimentar los elementos eléctricos. Cuando un alternador común está en funcionamiento, puede llegar a consumir hasta un 10% de la potencia empleada por el motor. Incorporando un alternador inteligente, el sistema selecciona cuándo debe funcionar este componente. Además, esta evolución incluye el freno regenerativo, un sistema que recupera energía en la frenada para depender aún menos de la potencia del motor de combustión para la alimentación de la batería y los elementos eléctricos de baja potencia.

### **3. Generador de arranque**

La tecnología de generador de arranque sustituye al alternador convencional y al motor de arranque por una única unidad de generador de arranque combinada que se instala entre el motor y la transmisión. El vehículo cuenta con los sistemas de freno regenerativo y start & stop descritos anteriormente.

Con la incorporación de estos elementos al vehículo convencional, se termina la definición de los vehículos microhíbridos.

### 6.1.2 Híbridos suaves o “Mild Hybrid”

Estos vehículos surgen de la necesidad de los fabricantes de cumplir las recientes normativas anticontaminación, cada vez más drásticas, junto con el nuevo ciclo de homologación de consumo y emisiones WLTP (World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure).

Para ello los fabricantes se centran en la electrificación total o parcial de sus flotas. En este tipo de hibridación se incorpora un pequeño motor eléctrico que asiste al motor térmico en los momentos en que este es menos eficiente, como puede ser en las aceleraciones o cambios de marcha. Para ello se conecta la correa del motor eléctrico a la polea del cigüeñal, lo que permite dar ese plus de potencia y par al motor térmico. De esta forma se consigue optimizar el uso del motor de combustión, siendo este el único que se encargue de impulsar al vehículo. Además, será necesario incluir una serie de baterías de pequeño tamaño (0,15 - 1 kWh y 48V) que permitan almacenar la energía que será empleada para activar el motor y otros sistemas eléctricos auxiliares.

En algunas configuraciones de este tipo de vehículos, el motor eléctrico también puede ejercer tracción sobre las ruedas. Sin embargo, el papel que desempeña el motor eléctrico es el mismo: asistencia al motor térmico, que es el protagonista en ejercer la potencia para la tracción del vehículo.



Figura 6.4: Logo de los vehículos Mild Hybrid

### 6.1.3 Híbridos completos o “Full Hybrid” (HEV)

Este tipo de vehículo es el primero en la escala de la electrificación que ofrece la posibilidad de conducción puramente eléctrica. Por tanto, resulta obvio que el motor eléctrico tiene tracción a las ruedas y potencia suficiente como para impulsar al vehículo únicamente con éste, llegando a velocidades superiores a 50 km/h. Sin embargo, su función principal, como los Mild Hybrid, también es apoyar al motor de combustión, buscando la máxima eficiencia y sostenibilidad energética.

La electrónica de estos vehículos permite que el motor eléctrico actúe como motor y como generador, de tal forma que al reducir velocidad empleando el freno, el motor eléctrico actúa como generador recargando las baterías. El vehículo podrá circular en modo eléctrico hasta que las baterías se descarguen, momento en el que entrará en funcionamiento el motor de combustión. Debido a estas características, el modo puramente eléctrico resulta especialmente aconsejable en entornos urbanos, donde hay muchas frenadas y permiten tener siempre carga disponible, permitiendo un ahorro de combustible que puede llegar el 25% respecto a la versión convencional.

La capacidad de las baterías depende del tamaño y del espacio del que disponga la plataforma de montaje. Por lo general, van desde unos pocos kWh hasta los 10 kWh. En función de ellas se obtendrá el valor de la autonomía en modo eléctrico.

Dado que el tren de potencia está formado por un motor eléctrico que puede funcionar de forma independiente al motor de combustión para mover al vehículo, hablamos de una configuración en paralelo.

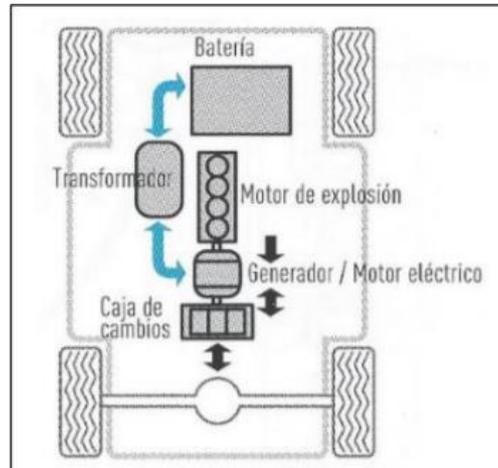


Figura 6.5: Esquema de configuración en paralelo

Sin embargo, aunque es muy poco frecuente, también podemos encontrar algunos de estos vehículos en configuración serie-paralelo:

Esta configuración se basa en la conexión del motor eléctrico y térmico mediante un engranaje planetario. La implantación de este engranaje supone un aumento de peso y de costes debido a su complejidad mecánica y electrónica.

El sistema en condiciones normales funcionara como hibrido paralelo, combinando las potencias de los motores eléctrico y térmico, aunque en función de los requerimientos de la tracción, la energía del motor térmico se aprovecharía para mover el generador y producir energía eléctrica. Por tanto, cualquier combinación de los motores sirve para impulsar el vehículo. Es la solución más eficiente de todas, pero también la más compleja.

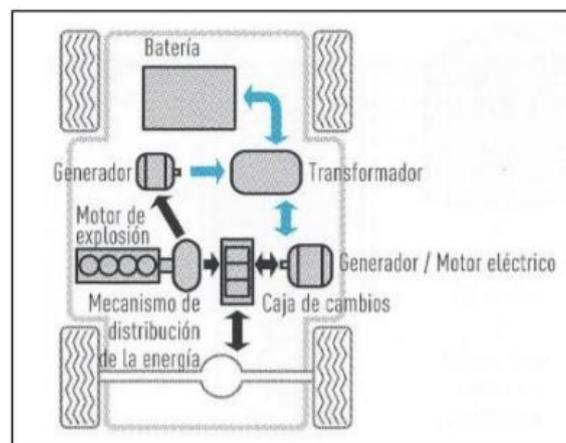


Figura 6.6: Esquema de configuración serie-paralelo

#### 6.1.4 Híbridos enchufables o “Plug-in Hybrid” (PHEV)

Se trata de vehículos cuyo funcionamiento es igual al tipo anterior, con la salvedad de que las baterías además pueden ser recargadas al ser enchufadas a la red eléctrica. Para ello disponen de un puerto de carga en las que los vehículos más modernos incluyen diferentes tomas, tanto de carga normal como de carga rápida. Estas tomas podrán ser conectadas en puntos específicos de carga en vía urbana o en el entorno doméstico.

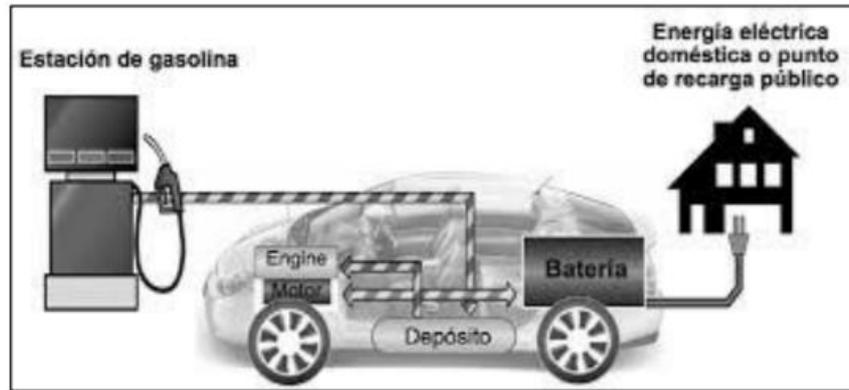


Figura 6.7: Puerto de carga de un PHEV

Por lo general tienen una autonomía bastante superior en modo eléctrico, lo que conllevaría un mayor ahorro en combustible. Pero también tienen aspectos negativos, como por ejemplo el encarecimiento de los PHEV respecto de los híbridos convencionales y un aumento de peso como consecuencia de equipar baterías más grandes.

Este tipo de vehículo, a diferencia del tipo anterior, ofrecen autonomías en modo eléctrico de unos 60 km, gracias a que la capacidad media de los híbridos enchufables se encuentra a partir de los 15 kWh. Por otra parte, se espera que la mayoría de los usuarios recargue sus vehículos durante la noche, con lo cual se aprovecharían las horas de baja demanda del sistema de generación eléctrica, cuya producción tiene un menor costo. Como se ha indicado anteriormente, estos vehículos son la transición natural hacia una movilidad 100% eléctrica, por lo que al disponer de un motor de combustión se consigue solucionar el principal problema de los vehículos eléctricos actualmente: la autonomía. Si las baterías se agotan durante la conducción en modo eléctrico, entraría en funcionamiento el motor de combustión dotando al vehículo de una elevada autonomía. Esto permitiría al usuario llegar al punto de carga más cercano y mientras tanto, las baterías irían almacenando carga mediante la frenada regenerativa.

### 6.1.5 Híbridos de rango extendido o (EREV)

El funcionamiento del tren de potencia de estos vehículos corresponde a la denominada configuración en serie de los vehículos híbridos:

Configuración en la que el motor térmico no tiene conexión mecánica con las ruedas, si no que va acoplado a un generador, de tal forma que se usa para generar electricidad y cargar el paquete de baterías, así se alimentará el motor eléctrico que propulsará las ruedas. Su funcionamiento es muy similar al de un vehículo eléctrico con la diferencia de que en este caso se puede generar energía durante la circulación para cargar las baterías y así lograr una mayor autonomía.

El motor térmico va acoplado a un generador y no al eje de transmisión. Funciona a un régimen óptimo, lo que reduce el consumo y emisiones, trabajando, por lo tanto, de una manera más eficiente. En el momento en el que las baterías están completamente cargadas, el motor se desconecta temporalmente.

El generador que va acoplado al motor térmico se encarga de generar la energía eléctrica que será enviada a las baterías acumuladoras.

El motor eléctrico será el encargado de transmitir el movimiento al eje de transmisión para mover las ruedas y recibirá la energía eléctrica de las baterías. A su vez, puede funcionar como generador para recuperar la energía generada durante las deceleraciones, mediante freno regenerativo, y así recargar las baterías.

Se denomina vehículo de rango extendido porque es prácticamente un vehículo puro eléctrico, solo que compensa las carencias de la tecnología de las baterías añadiendo el motor térmico y el generador para otorgarle autonomía al vehículo al recargar las baterías.

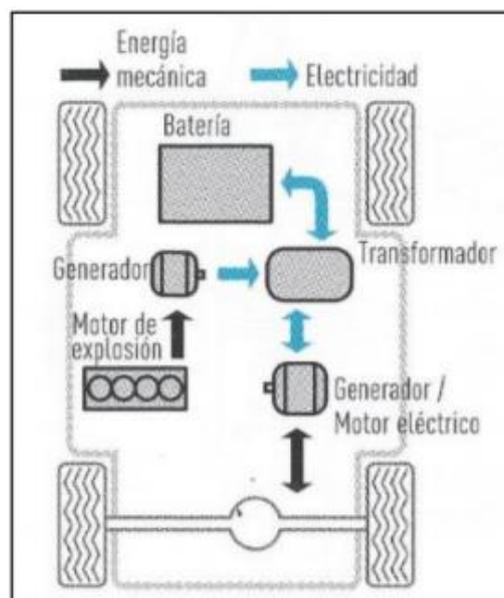


Figura 6.8: Esquema de configuración en serie

## 7. Vehículos Eléctricos

El nuevo contexto de movilidad coloca a los vehículos eléctricos como principal innovación en el campo del automóvil, sustituyendo estos a los vehículos convencionales de combustión interna. Los factores que influyen en el avance de esta tecnología van desde un aumento de la concienciación ambiental del usuario, hasta una mayor interacción del usuario con el vehículo.

Bien es cierto que, aunque la implantación de esta tecnología avanza favorablemente, lo hace de manera lenta debido a las barreras sociales y económicas que todavía existen como son el alto coste de esta tecnología, el elevado margen de mejora que tiene y la escasa infraestructura que respalda el uso del automóvil eléctrico. Los vehículos eléctricos contribuyen de manera notable al desarrollo sostenible del sector del transporte en todo el mundo, eliminando los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y la emisión de partículas nocivas al medio ambiente.

Para poder garantizar la sostenibilidad de este tipo de vehículos es necesario analizar minuciosamente la evaluación del ciclo de vida de estos, incluyendo su producción, funcionamiento y el final de su vida útil. En esta evaluación se tienen en cuenta desde los recursos de materias primas empleadas para su fabricación hasta la gestión de los deshechos una vez se llega al fin de la vida del vehículo.

Uno de los principales motivos que favorecen el rápido desarrollo de la electrificación del parque automovilístico, es la necesidad de los distintos fabricantes de cumplir los objetivos fijados por la Unión Europea en el Reglamento CE N.º 443/2009, por el cual se establece la necesidad de reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero de los países de la UE para 2020, estableciendo un valor máximo de 95 g de CO<sub>2</sub>/km para los vehículos ligeros de nueva matriculación. Esto hace que la mayoría de los fabricantes incluyan versiones eléctricas en su flota y continúen investigando nuevas mejoras que añadir.



Figura 7.1: Imagen representativa de impacto social y ambiental del vehículo eléctrico

Sin embargo, esta tecnología también tiene algunos aspectos mejorables que frenan su implantación como son la escasa autonomía de las baterías, aunque algunos modelos son capaces de realizar largos recorridos actualmente, los elevados tiempos de carga y en especial, la escasa infraestructura de carga existente. Además, por lo general las versiones eléctricas suelen ser más caras que las convencionales.

En cuanto a su funcionamiento, su principal característica es que la fuente de energía empleada para producir su movimiento es la electricidad. En ellos se sustituye el motor de combustión interna por uno o varios motores eléctricos, los cuales son movidos por la energía eléctrica almacenada en un conjunto de baterías acumuladoras de gran capacidad. La energía química disponible en las baterías de alta tensión se transforma a en energía eléctrica, que servirá para poner el funcionamiento el motor y así proporcionar la tracción necesaria al eje motriz del vehículo. Por tanto, se entiende por vehículos eléctricos aquellos que están propulsados totalmente por energía eléctrica procedente de baterías que se recargan en la red eléctrica.

En cuanto a la eficiencia energética de los vehículos eléctricos, su dato es demoledor respecto a los vehículos térmicos. Esto se debe a que la eficiencia de los motores de combustión, según las leyes de la termodinámica, como máximo pueden ofrecer un rendimiento teórico del 55% para los motores de gasolina y del 70% para los motores diésel, siendo la realidad muy distinta. Los motores gasolina con ciclo Otto tienen un rendimiento real comprendido entre el 20 y el 30%, y los diésel entre el 30 y el 40% en el mejor de los casos, siendo el resto de la energía desaprovechada. Estas pérdidas son debidas al rozamiento de piezas dentro del motor o en el sistema de tracción, entre otros. En cambio, los motores eléctricos operan con rendimientos reales superiores al 75%, pudiendo llegar incluso al 95%.

Otro aspecto destacable, es que los vehículos eléctricos encuentran su mayor aprovechamiento energético en el entorno urbano, debido al empleo del freno regenerativo que permite obtener energía eléctrica para recargar las baterías a partir de la energía cinética que tiene el vehículo debido a su velocidad. Debido a las múltiples frenadas que se realizan durante la conducción en ciudad, se consigue tener un estado de carga aceptable.

Como conclusión, bien es cierto que, en la actualidad, los fabricantes se están decantando por la hibridación de sus modelos, ya que les ayuda a cumplir con los objetivos de emisiones marcados, además de solventar los problemas que conllevan actualmente los vehículos eléctricos, como son la escasa autonomía que ofrecen las baterías y los elevados tiempos de recarga. Pese a esto, la investigación y desarrollo que está experimentando la tecnología eléctrica aplicada al automóvil sigue creciendo mucho, por lo que cada vez hay más modelos 100% eléctricos.

## 8. Dimensionamiento del sistema de accionamiento electromecánico

El dimensionado de un sistema de accionamiento electromecánico es el diseño y cálculo de los parámetros de un motor (utilizaremos un motor eléctrico de inducción), del sistema de arranque y los acoplamientos mecánicos para accionar adecuadamente la carga que en este caso se trata de un vehículo eléctrico. El modelo de vehículo eléctrico que se utilizará es el Nissan Leaf.

De las fichas técnicas se definirá su curva par-velocidad y después elegiremos el motor más adecuado por su funcionamiento, entre las condiciones hay que recordar que el par motor tiene que ser mayor o igual al par de la carga para poner en movimiento. El sistema de acoplamiento mencionado se utiliza para conectar el movimiento de la carga, lineal, al movimiento rotatorio del motor.

Nótese que, al realizar el dimensionamiento de este vehículo, se incorpora un motor asíncrono de inducción trifásico a un vehículo que inicialmente lleva un motor síncrono de imanes permanentes.

### 8.1 Selección de la carga

Necesitamos obtener el par resistente del vehículo eléctrico y sabemos que puede tener una relación constante, proporcional o cuadrática con respecto a la velocidad. En realidad, la carga posee una combinación de varios tipos de carga. A continuación, estudiaremos únicamente que la carga depende de la velocidad.

Para ello habremos de utilizar los datos especificados en la ficha técnica del vehículo que suministra la marca. A continuación, se dispone la ficha técnica a modo de figura:

|                            |                                |
|----------------------------|--------------------------------|
| <b>MOTOR</b>               |                                |
| Motor eléctrico            | Síncrono de imanes permanentes |
| Potencia máxima CV         | 109 CV                         |
| Potencia máxima kW/rpm     | 80 kW/rpm                      |
| Par máximo                 | 254 Nm/ 3.008 rpm              |
| Tensión nominal            | 360 V                          |
| <b>PRESTACIONES</b>        |                                |
| Velocidad máxima           | 135 km/h                       |
| Aceleración de 0-100 km/h  | 13,5 s                         |
| <b>CONSUMO Y AUTONOMÍA</b> |                                |
| Consumo eléctrico          | 13,0 Wh/km                     |
| Autonomía NEDC             | 24 = 199 km<br>30 = 250 km     |
| <b>TRANSMISIÓN</b>         |                                |
| Tracción                   | Delantera                      |

Figura 8.1: Ficha Técnica Nissan Leaf Parte 1

| <b>INFORMACIÓN TÉCNICA BATERÍA</b>   |                           |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Tipo                                 | Iones de litio            |
| Capacidad                            | 24 Kwh – 30 Kwh           |
| Capacidad útil                       | — Kwh — Kwh               |
| Extraíble (S/N)                      | NO                        |
| Numero de celdas                     | —                         |
| Tipo de carga / tiempo 100%          | 230V/16A / 24 – 6.5 horas |
| Carga Acelerada / Rápida tiempo 100% | 30 min                    |
| <b>DIMENSIONES</b>                   |                           |
| Coefficiente Aerodinámico            | 0.28cx                    |
| Largo                                | □□□□□□□□□□□□4.445 mm      |
| Ancho                                | 1.967 mm                  |
| Alto                                 | 1.550 mm                  |
| Distancia entre ejes                 | 2.700 mm                  |
| <b>PESO</b>                          |                           |
| Peso en vacío min/max                | 1.475 kg (24) / 1498 (30) |
| <b>CAPACIDADES</b>                   |                           |
| Peso max autorizado                  | 1.945 kg / 1.966 kg       |
| Número de puertas                    | 5                         |
| Número de plazas                     | 5                         |
| Capacidad de maletero                | 395 l                     |
| <b>CHASIS y NEUMÁTICOS</b>           |                           |
| Suspensión delantera                 | Pseudo-Mc Pherson         |
| Suspensión trasera                   | Ballesta de torsión       |
| Frenos delanteros                    | Disco                     |
| Frenos traseros                      | Disco                     |
| Neumáticos                           | 205 55 R16 / 215 50 R17   |
| Llantas                              | Aluminio 16" y 17"        |

Figura 8.2: Ficha Técnica Nissan Leaf Parte 2

## 8.2 Cálculo de la Fuerza y la Potencia

### 8.2.1 Cálculo de la Fuerza

En este apartado se tendrán en cuenta y calcularán todos los coeficientes de fuerza que supongan una oposición o resistencia al movimiento deseado del vehículo. Para ello, emplearemos una expresión de fuerza en función de la velocidad:

$$F_r(v) = A_L \cdot v^2 + C_L + C_G$$

#### **Fuerza de rozamiento con el aire:**

Este parámetro tiene una relación cuadrática con respecto a la velocidad del vehículo, como observamos en la siguiente ecuación:

$$A_L = -\frac{\rho C_d A_f}{2}$$

Siendo:

- $A_L$ , el coeficiente de fuerza de rozamiento del aire ( $\text{Ns}^2/\text{m}^2$ ).
- $\rho$ , la densidad del aire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- $C_d$ , el coeficiente aerodinámico de rozamiento, obtenido de la figura de la ficha técnica del vehículo adjunta en el apartado anterior.
- $A_f$ , el área frontal efectiva, obtenida como producto de las principales dimensiones frontales (alto y ancho) proporcionadas en la figura de la ficha técnica del vehículo.

Calculamos el parámetro ya con los datos numéricos:

$$\rho = 1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$C_d = 0,280$$

$$A_f = 1,550 \cdot 1,967 = 3,049 \text{ m}^2$$

$$A_L = -\frac{\rho C_d A_f}{2} = -\frac{1,225 \cdot 0,28 \cdot 3,049}{2} = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$A_L = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

### Fuerza de rozamiento con el suelo:

Este parámetro varía en función de las características del terreno por el cual se produce el movimiento del coche. Vamos a suponer que se trata de una conducción por carretera y, por tanto, tomaremos los parámetros característicos de terreno de asfalto.

Además, este parámetro es una constante con respecto a la velocidad, es decir, no depende de ella.

Este parámetro tiene de expresión:

$$C_L = C_{L0} = -f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$$

Siendo:

- $C_L$ , el par de carga.
- $C_{L0}$ , el par de carga inicial (en el arranque).
- $f_r$ , el coeficiente de rozamiento del terreno.
- $m$ , la masa máxima soportada por el vehículo (ficha técnica).
- $g$ , la constante de la acción gravitatoria para con la fuerza peso.
- $\alpha$ , el ángulo formado entre la pendiente del terreno y el eje cartesiano horizontal.

Como expresamos en la ecuación, indicamos que el par de arranque por rozamiento es igual al término constante del par por rozamiento. En la mayoría de los casos el par de arranque es mayor que el par resistente en movimiento.

Véase también, que este coeficiente alcanza su valor máximo, ya que consideramos que el vehículo circula en llano y por tanto, la pendiente del terreno es nula, por lo que  $\alpha = 0$  y  $\cos(0)=1$ .

Dicho esto, calculamos los datos necesarios y obtenemos el parámetro:

$$f_r = 0,025$$

$$m = 1966 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\alpha = 0^\circ$$

$$C_L = C_{L0} = -f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = -0,025 \cdot 1966 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = -482,162 \text{ N}$$

$$C_L = -482,162 \text{ N}$$

### **Fuerza debida a la componente del peso en la dirección del movimiento:**

Este parámetro depende únicamente de la acción gravitatoria y del grado de inclinación del suelo. Es decir, como el anterior parámetro, también será una constante con respecto a la velocidad. Se define por la siguiente ecuación:

$$C_G = -m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

Siendo:

- $C_G$ , el parámetro de la fuerza que se desea obtener.
- $m$ , la masa máxima soportada por el vehículo (ficha técnica).
- $g$ , la constante de la acción gravitatoria para con la fuerza peso.
- $\alpha$ , el ángulo formado entre la pendiente del terreno y el eje cartesiano horizontal.

Observamos que, en este caso, cuanto mayor sea el ángulo alfa (entre 0 y 90 grados), mayor será el parámetro. Pero ya hemos determinado el valor de alfa, siendo éste igual a 0 grados, o sea que este parámetro no supondrá ninguna fuerza de carga.

Obtenemos pues, el parámetro:

$$C_G = -m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = -1966 \cdot 9,81 \cdot \sin(0) = 0 \text{ N}$$

Se ha de remarcar que los coeficientes encontrados tienen el signo negativo porque son fuerzas que se oponen al movimiento. Por último, se observa que, en nuestra expresión de fuerza, no aparece el término proporcional con la velocidad de forma lineal  $B_L$ .

Nuestra expresión de la fuerza en función de la velocidad, en términos numéricos es:

$$F_r(v) = A_L \cdot v^2 + C_L + C_G = -0,523 \cdot v^2 - 482,162 - 0$$

$$F_r(v) = -0,523 \cdot v^2 - 482,162 \text{ N}$$

## 8.2.2 Cálculo de la Potencia

Para realizar el cálculo de la potencia hace falta establecer un punto de funcionamiento. Es decir, que habremos de tomar un valor velocidad concreto para poder completar la ecuación.

Para escoger este punto de funcionamiento, escogeremos la velocidad máxima del vehículo, para sacar sus máximas prestaciones. El Nissan Leaf analizado tiene una velocidad punta de 135 km/h. Una velocidad algo superior a la velocidad máxima permitida para los turismos dentro de España (120 km/h).

$$P(v) = F_r(v) \cdot v$$

Es importante tomar el valor absoluto de este parámetro, ya que, queremos calcular la potencia que ha de tener el motor, nos es indiferente el sentido que posea la fuerza.

Aplicando pues, la velocidad de 135 km/h, que expresados en metros por segundo son 37,5 m/s.

$$P(37,5) = F_r(37,5) \cdot 37,5 = (0,523 \cdot 37,5^2 + 482,162) \cdot 37,5$$

$$P(37,5) = 45,661 \text{ kW}$$

Una vez conocido este dato, procederemos a la selección del motor eléctrico de inducción adecuado para estas prestaciones de potencia.

## 8.3 Selección del motor

Seleccionaremos el motor de inducción de la tabla siguiente (motores predeterminados del programa MATLAB) considerando que su potencia debe ser mayor que la máxima calculada.

| nº | P (Kw) | V   | f  | R <sub>1</sub> | L <sub>1</sub> | R' <sub>2</sub> | L' <sub>2</sub> | L <sub>m</sub> | R <sub>fe</sub> | J     | B        | p | w (rpm) |
|----|--------|-----|----|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------|----------|---|---------|
| 1  | 3,73   | 460 | 60 | 1,115          | 0,005974       | 1,083           | 0,005974        | 0,2037         | 796,95          | 0,02  | 0,005752 | 2 | 1750    |
| 2  | 7,46   | 460 | 60 | 0,6837         | 0,004152       | 0,451           | 0,004152        | 0,1486         | 751,01          | 0,05  | 0,008141 | 2 | 1760    |
| 3  | 14,92  | 460 | 60 | 0,2761         | 0,002191       | 0,1645          | 0,002191        | 0,07614        | 791,26          | 0,1   | 0,01771  | 2 | 1760    |
| 4  | 37,3   | 460 | 60 | 0,09961        | 0,000867       | 0,05837         | 0,000867        | 0,03039        | 589,48          | 0,4   | 0,02187  | 2 | 1780    |
| 5  | 74,6   | 460 | 60 | 0,03957        | 0,000389       | 0,02215         | 0,000389        | 0,01664        | 487,21          | 1,3   | 0,05543  | 2 | 1780    |
| 6  | 111,9  | 460 | 60 | 0,0302         | 0,000283       | 0,01721         | 0,000283        | 0,01095        | 430,54          | 2     | 0,02154  | 2 | 1785    |
| 7  | 149,2  | 460 | 60 | 0,01818        | 0,00019        | 0,00996         | 0,00019         | 0,009415       | 403,21          | 2,6   | 0,04789  | 2 | 1785    |
| 8  | 3,73   | 575 | 60 | 2,053          | 0,008101       | 1,904           | 0,008101        | 0,3144         | 1245,24         | 0,02  | 0,002494 | 2 | 1750    |
| 9  | 7,46   | 575 | 60 | 0,9174         | 0,005473       | 0,6258          | 0,005473        | 0,1854         | 1173,46         | 0,05  | 0,005879 | 2 | 1760    |
| 10 | 14,92  | 575 | 60 | 0,454          | 0,002915       | 0,2938          | 0,002915        | 0,1077         | 994,53          | 0,1   | 0,008209 | 2 | 1765    |
| 11 | 37,3   | 575 | 60 | 0,09871        | 0,001245       | 0,1081          | 0,001245        | 0,04717        | 921,07          | 0,4   | 0,02481  | 2 | 1775    |
| 12 | 74,6   | 575 | 60 | 0,05963        | 0,000633       | 0,03281         | 0,000633        | 0,02742        | 761,27          | 1,3   | 0,0396   | 2 | 1780    |
| 13 | 111,9  | 575 | 60 | 0,04587        | 0,000424       | 0,02634         | 0,000424        | 0,01599        | 698,43          | 2     | 0,02083  | 2 | 1785    |
| 14 | 149,2  | 575 | 60 | 0,02475        | 0,000284       | 0,0133          | 0,000284        | 0,01425        | 633,42          | 2,6   | 0,06346  | 2 | 1785    |
| 15 | 4      | 400 | 50 | 1,405          | 0,005839       | 1,395           | 0,005839        | 0,1722         | 893,51          | 0,013 | 0,002985 | 2 | 1430    |
| 16 | 7,5    | 400 | 50 | 0,7384         | 0,003045       | 0,7402          | 0,003045        | 0,1241         | 822,76          | 0,034 | 0,000503 | 2 | 1440    |
| 17 | 15     | 400 | 50 | 0,2147         | 0,000991       | 0,2205          | 0,000991        | 0,06419        | 710,89          | 0,102 | 0,009541 | 2 | 1460    |
| 18 | 37     | 400 | 50 | 0,08233        | 0,000724       | 0,0503          | 0,000724        | 0,02711        | 556,14          | 0,37  | 0,02791  | 2 | 1480    |
| 19 | 75     | 400 | 50 | 0,03552        | 0,000335       | 0,02092         | 0,000335        | 0,0151         | 450,23          | 1,25  | 0,03914  | 2 | 1484    |
| 20 | 110    | 400 | 50 | 0,02155        | 0,000226       | 0,01231         | 0,000226        | 0,01038        | 423,43          | 2,3   | 0,05421  | 2 | 1487    |
| 21 | 160    | 400 | 50 | 0,01379        | 0,000152       | 0,00773         | 0,000152        | 0,00769        | 395,64          | 2,9   | 0,05658  | 2 | 1487    |

Figura 8.3: Tabla de Selección de Motor

Como vemos en la figura, se ha seleccionado el motor número 19 porque es el motor que otorga la potencia inmediatamente superior al valor que hemos calculado.

Además de la potencia, en la figura se especifican los valores del circuito equivalente del motor, cuyo esquema se dispondrá en el apartado de Planos del proyecto.

Sin embargo, es conveniente especificar el significado de cada parámetro:

- Tensión nominal (V):  $V= 400$ .
- Frecuencia (Hz):  $f= 50$ .
- Resistencia del devanado primario ( $\Omega$ ):  $R_1= 0,03552$ .
- Inductancia del devanado primario (H):  $L_1= 0,000335$ .
- Resistencia del devanado secundario ( $\Omega$ ):  $R'_2= 0,02092$ .
- Inductancia del devanado secundario (H):  $L'_2= 0,000335$ .
- Inductancia del núcleo magnético (H):  $L_m= 0,0151$ .
- Resistencia del hierro del núcleo magnético ( $\Omega$ ):  $R_{fe}= 450,23$ .
- Inercia del rotor ( $kg \cdot m^2$ ):  $J= 1,25$
- Intensidad del campo magnético ( $\frac{W}{(rad/s)^2}$ ):  $B= 0,03914$ .
- Número de pares de polos (ud.):  $p=2$
- Revoluciones por minuto (rpm):  $n=1484$

Una vez determinados estos parámetros, podemos calcular la velocidad de sincronismo ( $n_s$ ) y el deslizamiento ( $s$ ).

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = n_s \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} = 157,08$$

$$s_N = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1484}{1500} = 0,0107$$

## 8.4 Selección del acople carga-motor

Es necesario conectar el movimiento lineal de la carga con el movimiento rotatorio del rotor. En la ficha técnica no se especifica el tipo de transmisión del vehículo, pero como hablamos de un puro eléctrico, suponemos una transmisión directa (sin embrague).

Utilizaremos el siguiente esquema para realizar el acoplamiento:

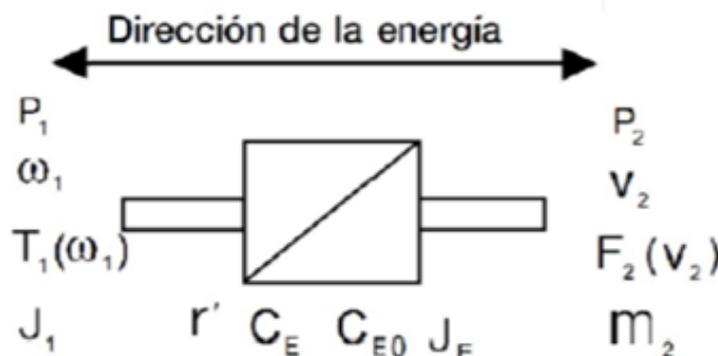


Figura 8.4: Esquema de acoplamiento carga-motor

Y las correspondientes ecuaciones del esquema:

$$T(\omega) = F_2(\omega_1 \cdot r') \cdot r' + \text{sign}(\omega) \cdot C_E + C_{E0}$$

$$v_2 = \omega_1 \cdot r' \quad \rightarrow \quad r' = \frac{v_2}{\omega_1}$$

$$P_1 = P_2 + C_E \cdot \omega_1$$

$$J_1 = m_2 \cdot r'^2 + J_E$$

Siendo:

-  $r$  (m): la relación de transmisión.

-  $C_E$  y  $C_{E0}$  (Nm): el par resistente por el rozamiento del engranaje y este mismo par en condiciones iniciales, respetivamente.

-  $v_2$  (m/s): la velocidad lineal de la carga.

-  $\omega_1$  (rad/s): la velocidad rotativa del motor.

Calculamos los parámetros:

$$\omega_n = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} = 1484 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} = 155,404 \text{ rad/s}$$

$$r' = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{37,5}{155,404} = 0,241 \text{ m}$$

Suponemos que el par resistente del engranaje y el de arranque son equivalentes ( $C_E = C_{E0}$ ). También suponemos un rendimiento del 97%, algo bastante habitual en los engranajes de esta aplicación.

$$P_1 = P_2 + C_E \cdot \omega_n$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta = 45,661 \cdot 0,97 = 44,291 \text{ kW}$$

$$C_E = -\frac{P_1 - P_2}{\omega_n} = -\frac{45661 - 44291}{155,404} = -8,816 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Y despreciamos el momento de inercia del acople  $J_E$ , ya que será insignificante comparado al del vehículo.

$$J_1 \approx m_2 \cdot r'^2 = 1966 \cdot 0,241^2 = 114,478 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Con estos coeficientes ya podemos obtener las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo:

$$A'_L = A_L \cdot r'^3 = -0,523 \cdot 0,241^3 = -7,321 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$C'_L = C'_{L0} = C_L \cdot r' + C_E = -482,162 \cdot 0,241 - 8,816 = -125,017$$

$$C'_G = C_G \cdot r' = 0 \cdot 0,241 = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### 8.4.1 Curva del par de la carga

El par requerido por la carga en el eje motor tiene esta ecuaci3n:

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot A'_L \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot C'_L + C'_G$$

Se representa esta funci3n en programa Excel con el signo negativo para poder obtener la curva de par-velocidad de la carga y compararla con la del motor.

$$T_L = -1 \cdot \left( \frac{|\omega|}{\omega} \cdot A'_L \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot C'_L + C'_G \right)$$

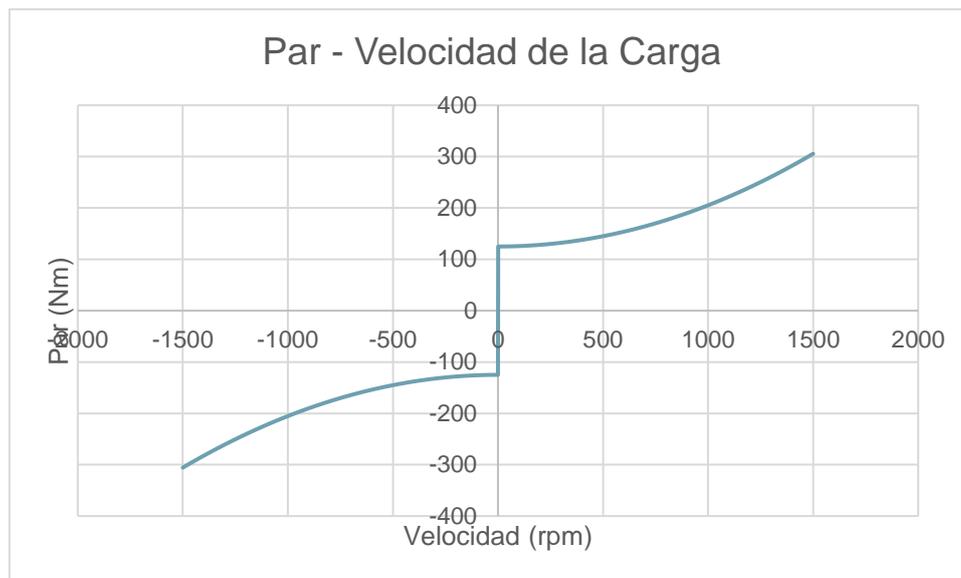


Figura 8.5: Curva de par-velocidad de la carga

### 8.5 Parámetros del accionamiento

Determinaremos los principales parámetros mecánicos y eléctricos del motor seleccionado, describiendo el circuito equivalente de éste, que se encontrará en el apartado de planos, pero que también presentaré como figura para hacer el seguimiento de este apartado algo más visible.

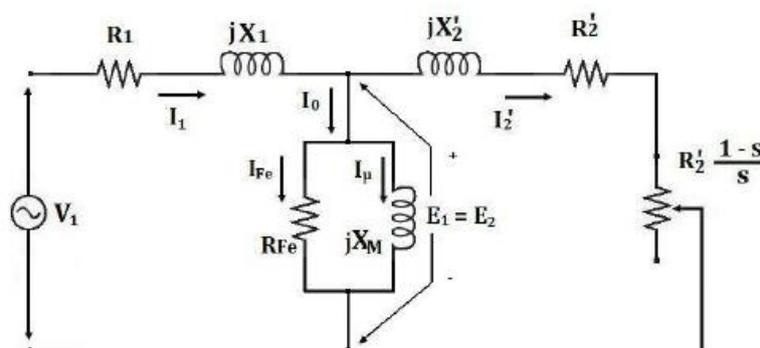


Figura 8.6: Circuito eléctrico equivalente de un motor de inducción

Recapitulando los datos del motor:

$$R_1 = 0,03552\Omega \quad L_1 = L'_2 = 0,000335H \quad R'_2 = 0,02092\Omega \quad L_m = 0,0151H$$

$$R_{fe} = 450,23\Omega \quad p = 2 \quad n = 1484rpm \quad f = 50Hz \quad \omega_s = 157,08/s$$

$R'_c$  es la resistencia de la carga reducida al estator. Ésta disipa una potencia igual a la que se convierte en energía mecánica y depende de la velocidad de giro del rotor (contenida en el deslizamiento). Suponiendo que el rotor gira a velocidad nominal:

$$R'_c = R'_2 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1\right) = 0,02092 \cdot \left(\frac{1}{0,0107} - 1\right) = 1,934\Omega$$

También calculamos  $X_{cc}$ , que se define por la siguiente expresión:

$$X_{cc} = 2\pi f \cdot (L_1 + L'_2) = 314,159 \cdot (0,000335 + 0,000335) = 0,21\Omega$$

### 8.5.1 Par e Intensidad de Arranque

Efectuaremos una conexión en estrella, por lo que el voltaje nominal será  $\frac{400}{\sqrt{3}} \approx 230V$ .

Con estos datos ya podemos obtener tanto el par, como la intensidad del arranque, es decir, cuando la velocidad es igual a 0 y, por tanto, el deslizamiento es igual a 1. Nota:

$m_1 = \text{fases del estator} = 3$ .

$$T_{arr} = \frac{m_1 \cdot \frac{R'_2}{s}}{\omega_s} \cdot \frac{V_N^2}{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + X_{cc}^2} = \frac{3 \cdot \frac{0,02092}{1}}{157,08} \cdot \frac{230^2}{(0,03552 + \frac{0,02092}{1})^2 + 0,21^2}$$

$$T_{arr} = 446,982 Nm$$

$$I_{arr} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + X_{cc}^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,03552 + \frac{0,02092}{1})^2 + 0,21^2}} = 1057,704 A$$

$$I_{arr} = 11057,704 A$$

La intensidad de arranque es muchísimo mayor a la nominal, que concuerda con la experiencia de los motores donde, durante el arranque, se produce un pico de corriente altísimo. Esta corriente se produce en el arranque directo y es inadmisibles dado su elevado valor.

### 8.5.2 Par máximo y velocidad a la que se produce

El par máximo se calcula poniendo igual a cero la derivada de la expresión del par  $T_m$  con respecto al deslizamiento.

$$\frac{dT}{ds} = 0$$

Realizando esta derivada, obtenemos la expresi3n del deslizamiento a par m3ximo.

$$s_{T_{max}} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}} = \frac{0,02092}{\sqrt{0,03552^2 + 0,21^2}} = 0,0982$$

Y del par m3ximo:

$$T_{max} = \frac{3 \cdot V_N^2}{\omega_s \cdot 2 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2})} = \frac{3 \cdot 230^2}{157,08 \cdot 2 \cdot (0,03552 + \sqrt{0,03552^2 + 0,21^2})}$$

$$T_{max} = 2366,937$$

Este par se produce a la velocidad m3xima, que es:

$$\omega_{max} = \omega_s \cdot (1 - s_{max}) = 157,08 \cdot (1 - 0,0982) = 141,655 \text{ rad/s}$$

$$n_{max} = \omega_{max} \cdot \frac{60}{2\pi} = 141,655 \cdot \frac{60}{2\pi} = 1371 \text{ rpm}$$

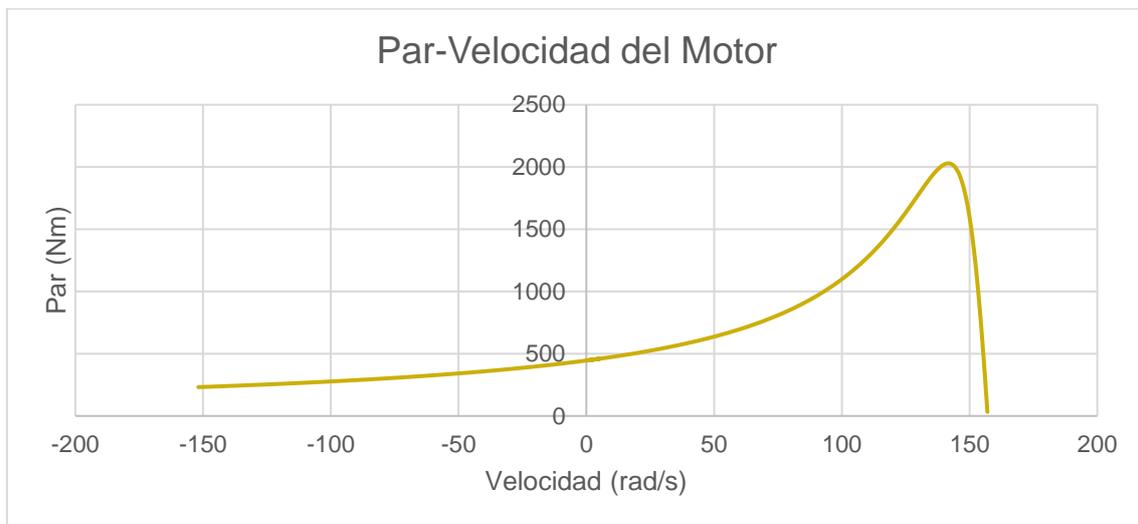


Figura 8.7: Curva par-velocidad del motor

### 8.5.3 Potencia m3xima y velocidad a la que se produce

Para obtener la potencia m3xima producida, tambi3n tendremos que derivar. Igualaremos a 0 esta derivada, que ser3 con respecto a la velocidad  $\omega$ .

$$\frac{dP}{d\omega} = 0$$

Esto nos dar3 el punto de tangente horizontal en la funci3n potencia-velocidad. Es decir, que tambi3n podremos obtener valor a trav3s de la gr3fica, localizando el punto con tangente horizontal.

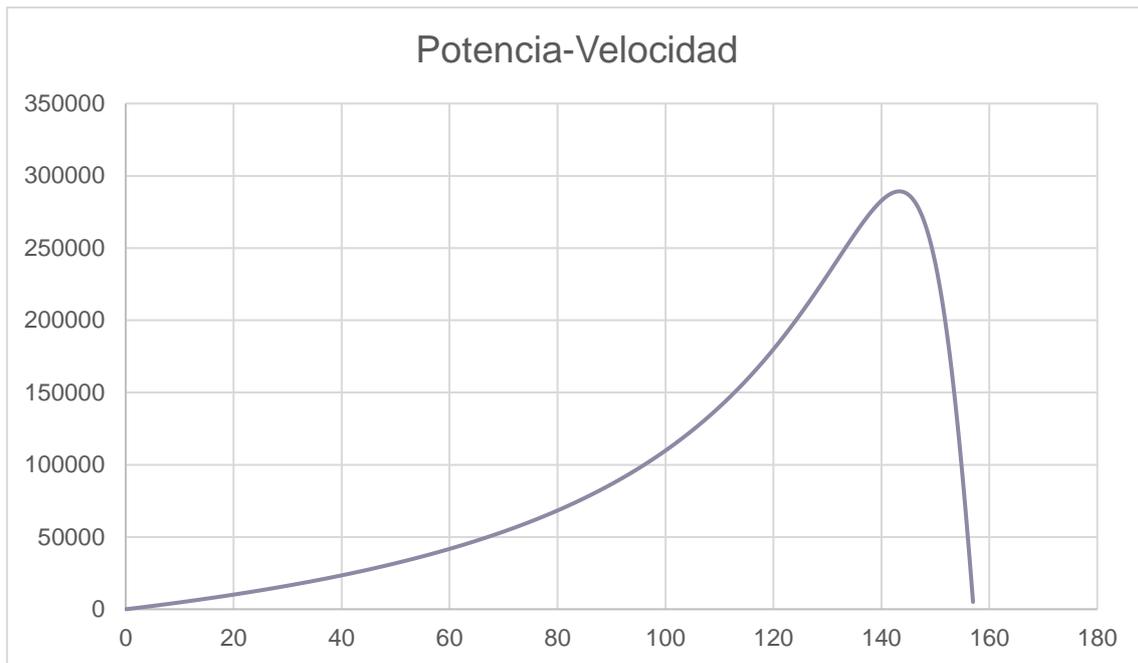


Figura 8.8: Curva Potencia-Velocidad

Obtenemos que el punto de tangente horizontal tiene una de:  $P_{max} = 289,215 \text{ kW}$ .

Y la velocidad del motor cuando alcanza esa potencia es:  $\omega = 143,361 \text{ rad/s}$

#### 8.5.4 Capacidad de sobrecarga

Este parámetro nos indica la relación que hay entre el par máximo ( $T_{max}$ ) que puede alcanzar el motor con respecto al par nominal ( $T_N$ ) de la máquina. Por eso, habremos de calcular el par nominal primero, obtenido con el deslizamiento nominal descrito en la selección del motor:

$$s_N = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1484}{1500} = 0,0107$$

$$T_N = \frac{m_1 \cdot \frac{R'_2}{s_N}}{\omega_s} \cdot \frac{V_{1N}^2}{(R_1 + \frac{R'_2}{s_N})^2 + X_{cc}^2} = \frac{3 \cdot \frac{0,02092}{0,0107}}{157,08} \cdot \frac{230^2}{(0,03552 + \frac{0,02092}{0,0107})^2 + 0,21^2} = 492,984 \text{ Nm}$$

$$T_N = 492,984 \text{ Nm}$$

Ahora simplemente realizamos el cociente entre ambos pares para saber la capacidad de sobrecarga (C), que es adimensional.

$$C = \frac{T_{max}}{T_N} = \frac{2366,937}{492,984} = 4,801$$

Es un valor bastante grande, pero posible y realista en este tipo de aplicaciones. Este valor significa que la máquina puede soportar un par que casi quintuplica el valor del par nominal.

## 8.6 Parámetros del punto de funcionamiento (régimen permanente)

Es necesario encontrar el punto de funcionamiento para la potencia máxima absorbida. Todos los otros puntos de funcionamiento estático tienen velocidad inferior y se encontrarán por debajo de este valor.

La ecuación mecánica es:

$$T_M - [T_L] = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Empezamos estudiando el régimen permanente, donde el par motor es igual al par de la carga (equilibrio). Es decir, cuando  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . O sea, que también tendremos que la diferencia de pares es igual a 0.

$$T_M - [T_L] = 0 \rightarrow T_M = [T_L]$$

Se puede hacer el estudio gráficamente, como el realizado con la potencia. En este caso, en vez de mirar qué punto tiene tangente horizontal, observaremos la intersección entre las funciones de par motor y par de carga.

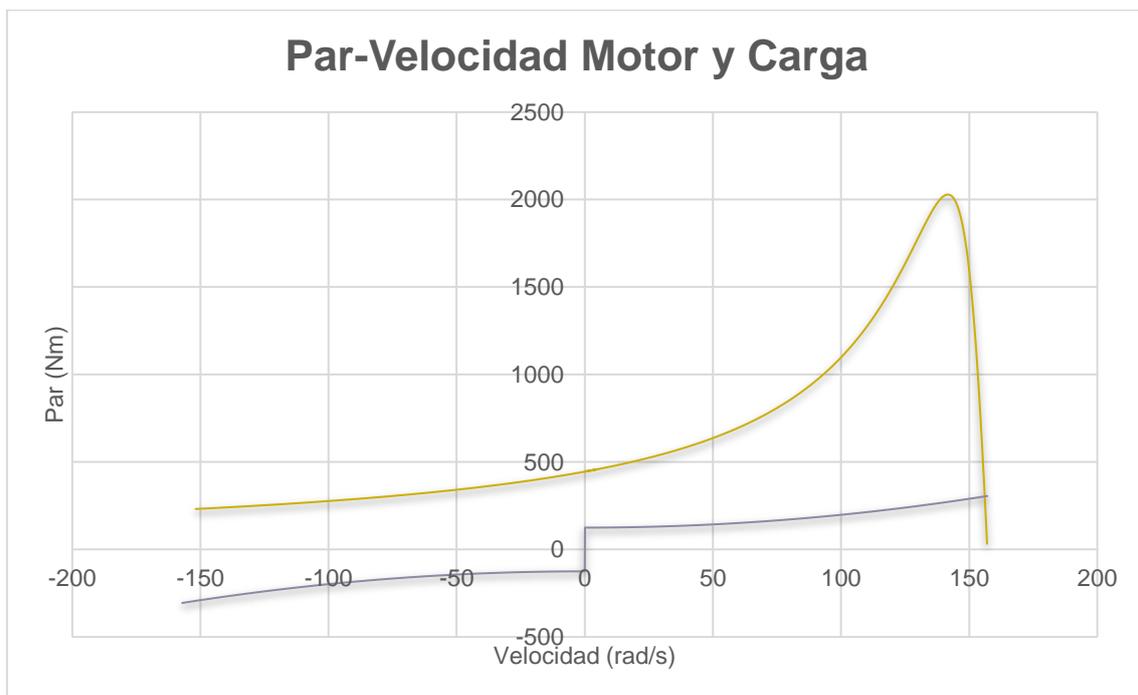


Figura 8.9: Curva Par-Velocidad del Motor y la Carga

Obtenemos que la velocidad en el punto de la intersección es de 156,56 rad/s o 1495 revoluciones por minuto.

El par correspondiente a esa velocidad tiene un valor de 304,44 Nm. Este dato se obtiene sustituyendo la velocidad anterior en cualquiera de las ecuaciones, par motor o par de carga, ya que es el punto intersección y el valor de ambas ecuaciones es equivalente para este dato de velocidad.

El punto de funcionamiento se categoriza como estable, ya que cualquier variación de la velocidad debida a una perturbación provoca el regreso natural a las condiciones de este punto.

### 8.6.1 Análisis energético de potencias

El análisis energético se hace siempre en el caso de punto funcionamiento estático con potencia máxima absorbida, que hemos especificado antes.

Calculamos los nuevos parámetros.

$$s_f = \frac{n_s - n_f}{n_s} = \frac{1500 - 1495}{1500} = 0.00333$$

$$R'_c = R'_2 \cdot \left( \frac{1}{s_f} - 1 \right) = 0,02092 \cdot \left( \frac{1}{0,00333} - 1 \right) = 6.255 \Omega$$

$$I'_f = \frac{V_N}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0.03552 + 0.02092 + 6,225)^2 + 0.21^2}} = 36,595 A$$

Siendo:

- $s_f$ , el deslizamiento a la velocidad del punto de funcionamiento.
- $R'_c$ , la resistencia equivalente que ofrece la carga a la velocidad del punto de funcionamiento.
- $I'_f$ , la intensidad presente en el circuito equivalente a la velocidad del punto de funcionamiento.

Y a continuación, podemos obtener todas las pérdidas: en el estator, en el hierro, en el rotor y por el rozamiento y ventilación.

$$P_{estator} = m_1 \cdot R_1 \cdot I'_f{}^2 = 3 \cdot 0,03552 \cdot 36,595^2 = 142.705 W$$

$$P_{fe} = \frac{m_1 \cdot V_N^2}{R_{fe}} = \frac{3 \cdot 230^2}{450,23} = 352.487 W$$

$$P_{rotor} = m_1 \cdot R'_2 \cdot I'_f{}^2 = 3 \cdot 0,02092 \cdot 36,595^2 = 84,048 W$$

$$P_{r,v} = B \cdot \omega_f^2 = 0,002985 \cdot 156,56^2 = 73.165 W$$

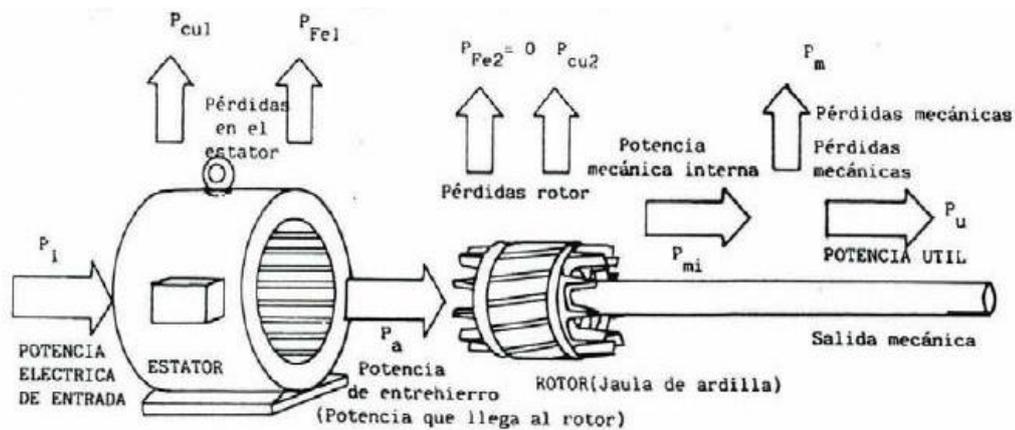


Figura 8.10: Pérdidas energéticas de un motor

Finalmente, calculamos la potencia mecánica y la potencia útil, definidas de la siguiente manera:

$$P_m = m_1 \cdot R'_c \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 6,255 \cdot 36,595^2 = 25.129,976 \text{ W}$$

$$P_u = P_m - P_{r,v} = 25129,976 - 73.165 = 25.056,811 \text{ W}$$

Una vez obtenidos todos los datos de potencias, podemos calcular el rendimiento del motor.

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_{estator} + P_{fe} + P_{rotor} + P_{r,v} + P_u} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = \frac{25.056,811}{142.705 + 352.487 + 84,048 + 73.165 + 25.056,811} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = 97,462$$

El rendimiento es bastante bueno. Se encuentra dentro de los estándares dentro de los motores de inducción asíncronos trifásicos.

## 8.7 Régimen transitorio

En el régimen transitorio ocurren variaciones de velocidad, es decir, el motor acelera o decelera hasta establecerse en un punto de funcionamiento y, por tanto:

$$T_M - [T_L] = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$\frac{d\omega}{dt} \neq 0$$

El motor acelera cuando el par motor es mayor que el módulo del par de carga. Matemáticamente, la derivada de la velocidad es positiva. Por el contrario, la deceleración ocurre en el caso opuesto, es decir, cuando el módulo del par de carga es superior al par motor y, por consiguiente, la derivada de la velocidad es negativa.

Se puede calcular el tiempo de arranque suponiendo la aceleración constante e igual a la inicial y arranque directo.

$$t_{arr} = \frac{J_{Total}}{T_{arr} - T_{L0}} \times \omega_f = \frac{114,478}{446,982 - 125,004} \times 156,56 = 55,664 \text{ s}$$

Este valor es absurdamente grande, cosa que demuestra la inviabilidad del arranque directo en los motores de inducción.

Considerando un arranque con un variador de frecuencia, podríamos sustituir el par de arranque por el par máximo en la ecuación de forma que obtendremos un valor de tiempo de arranque mucho más acorde al de los vehículos.

$$t_{arr} = \frac{J_{Total}}{T_{max} - T_{L0}} \times \omega_f = \frac{114,478}{2366,937 - 125,004} \times 156,56 = 7,994 \text{ s}$$

Con esta modificación, observamos que incluso tiene un tiempo de arranque menor a lo habitual. Esto te otorga más seguridad a la hora de acelerar, puesto que tienes una respuesta rápida a tu demanda.

### 8.7.1 Arranque directo

Ya hemos comentado la inviabilidad de este tipo de arranque por el gran tiempo de arranque que tendría el motor. Pero existe otro factor que imposibilita el arranque directo en estos motores. Hablo del pico de intensidad que obtenemos en el arranque:

$$I_{arr} = 11057,704 \text{ A}$$

Por tanto, hay que encontrar una solución en distintos tipos de arranque y evitar esta corriente y tiempo de arranque tan alto.

### 8.7.2 Arranque estrella-triángulo

Una de las posibilidades para resolver el problema del pico de corriente en el arranque es la configuración estrella-triángulo, donde la corriente inicial es menor, porque el motor arranca con una tensión menor. Solo hay que asegurar que el par de arranque, menor que el caso anterior debido a la menor tensión suministrada, es suficiente para poner en marcha el sistema. Cuando el motor ha adquirido una cierta velocidad, se conmutan las conexiones en triángulo.

$$I_{triangulo} = 3 \cdot I_{estrella}$$

$$T_{triangulo} = 3 \cdot T_{estrella}$$

Sin embargo, la corriente calculada es una corriente en estrella porque el motor elegido está conectado en estrella. Para disminuir la corriente se podrían utilizar otros métodos como el uso de resistencias en serie con el rotor.

También podríamos utilizar el variador de frecuencia y velocidad, donde el motor efectuaría arranques y paradas por medio de un dispositivo que variaría el par y la velocidad del motor mediante la alteración de la frecuencia aplicada. Esto se lograría rectificando la tensión alterna de red y por medio de transistores o IGBTs, trabajando en modulación de ancho de pulso que generaría la corriente trifásica de frecuencia y tensión variable que permitiría controlar la aceleración y par de arranque.

## 9. Ciclo de Conducción

Una vez descritos los cálculos del par de la carga y del motor, así como los parámetros del circuito eléctrico equivalente, se simulará un ciclo de conducción definido por distintos tramos de diferentes características. De esta manera, se someterá a análisis el dimensionamiento del motor bajo puntos de funcionamiento más reales.

He seleccionado un circuito de 17,2 km que conozco personalmente. Tiene emplazamiento en BENEJÚZAR, un pueblo de la Vega Baja de la Comunidad Valenciana y puede ofrecer estos puntos de funcionamiento:

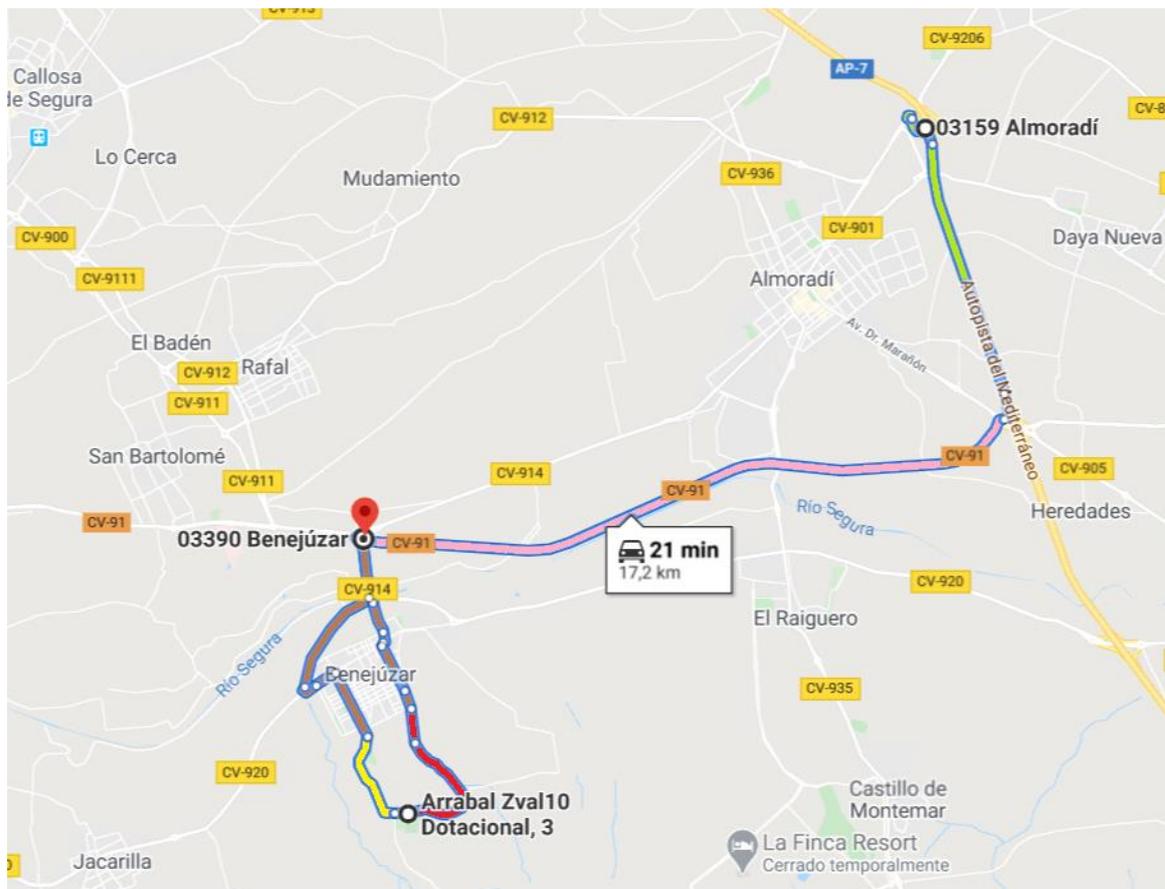


Figura 9.1: Circuito de Conducción Seleccionado

- **Conducción por autovía (verde):**  
Se trata de un tramo de 2,5 km por la Autopista del Mediterráneo (AP-7). Este es el recorrido inicial de la ruta y comienza en esta vía, a la altura de Almoradí. Una vez recorrida la distancia indicada, cuando nos acercamos a La Daya Nueva, se tomará la CV-91 "Camino hacia Jacarilla" para iniciar el tramo interurbano. Es una carretera llana y de velocidad media de 120 km/h
- **Conducción por vía interurbana (rosa):**  
Este tramo de vía interurbana tiene de 7,4 km por la CV-91 y nos lleva de la Autopista del Mediterráneo a BENEJÚZAR, tomando el desvío correspondiente por la CV-914. Es una carretera llana y de velocidad media de 80 km/h.

- **Conducción por vía urbana 1 (marrón):**  
La conducción por esta vía se divide en la ida y la vuelta, definiendo dos tramos de 1,1 km la ida y 2,9 km de vuelta, que nos lleva por los alrededores del pueblo hasta el conocido “Camino de la Pilarica”, que ya definiremos más tarde. Este tramo tiene una carretera llana y velocidad media de 50 km/h.
- **Conducción por vía urbana 2 (rojo):**  
Comienza aquí la subida del “Camino de la Pilarica”. Éste es un tramo de 1,9 km característico en el pueblo por ser el camino por donde se realiza la procesión de las festividades del pueblo. Este tramo es de carretera de pendiente 5° y velocidad media de 30 km/h.
- **Conducción por vía urbana 3 (amarillo):**  
Alcanzado el punto más alto de nuestro circuito y habiendo llegado al polideportivo del pueblo, empieza la bajada de 1,4 km. Este tramo tiene una carretera de pendiente  $-(10)^\circ$  y velocidad media de 30 km/h.

Una vez establecidas las características de cada tramo, se procederá a aplicar las ecuaciones ya explicadas anteriormente para observar las curvas que relacionan el par de la carga y el motor con la velocidad.

## 9.1 Autovía

### 9.1.1 Parámetros de la Carga

#### 9.1.1.1 Cálculos de Fuerza

##### **Fuerza de rozamiento con el aire:**

$$A_L = -\frac{\rho C_d A_f}{2} = -\frac{1,225 \cdot 0,28 \cdot 3,049}{2} = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$A_L = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

##### **Fuerza de rozamiento con el suelo:**

$$C_L = C_{L0} = -f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = -0,025 \cdot 1966 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 482,162 \text{ N}$$

$$C_L = -482,162 \text{ N}$$

##### **Fuerza debida a la componente del peso en la dirección del movimiento:**

$$C_G = -m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = -1966 \cdot 9,81 \cdot \sin(0) = 0 \text{ N}$$

##### **Expresión de la Fuerza en este tramo:**

$$F_r(v) = A_L \cdot v^2 + C_L + C_G = -0,523 \cdot v^2 - 480,327 - 0$$

$$F_r(v) = -0,523 \cdot v^2 - 482,162 \text{ N}$$

### 9.1.1.2 Cálculos de Potencia

#### Expresión de la Potencia:

$$P(v) = F_r(v) \cdot v$$

#### Para este tramo:

La velocidad en este tramo es de 120 km/h, utilizando el cociente de 3,6 obtenemos una velocidad de 33,333 m/s.

$$P(33,333) = F_r(33,333) \cdot 33,333 = (0,523 \cdot 33,333^2 + 482,162) \cdot 33,333 = 35,442 \text{ kW}$$

### 9.1.1.3 Acople Carga-Motor

#### Relación de transmisión:

$$r' = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{33,333}{155,404} = 0,214 \text{ m}$$

#### Par resistente del engranaje:

$$P_1 = P_2 + C_E \cdot \omega_n$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta = 35,442 \cdot 0,97 = 34,379 \text{ kW}$$

$$C_E = -\frac{P_1 - P_2}{\omega_n} = -\frac{35442 - 34379}{155,404} = -6,842 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### Coefficientes de Par:

$$A'_L = A_L \cdot r'^3 = -0,523 \cdot 0,214^3 = -7,321 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$C'_L = C'_{L0} = C_L \cdot r' + C_E = -482,162 \cdot 0,214 - 6,842 = -110,263$$

$$C'_G = C_G \cdot r' = 0 \cdot 0,214 = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### 9.1.1.4 Expresión y curva par-velocidad

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot A'_L \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot C'_L + C'_G$$

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-7,321 \cdot 10^{-3}) \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-110,263) + 0$$

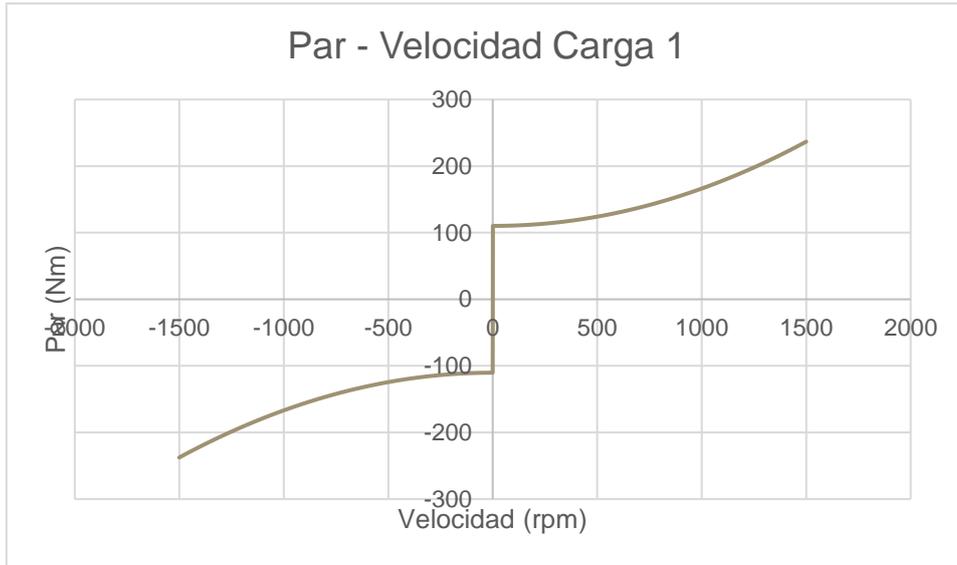


Figura 9.2: Curva Par-Velocidad de la Carga 1

### 9.1.2 Parámetros del punto de funcionamiento

Estudiamos el régimen permanente de cada punto de funcionamiento, donde el par motor es igual al par de la carga (equilibrio). Es decir, cuando  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . O sea, que también tendremos que la diferencia de pares es igual a 0.

$$T_M - [T_L] = 0 \rightarrow T_M = [T_L]$$

Habremos de fijarnos en la intersección de las gráficas de par motor con la de carga, obtenida en el apartado anterior:

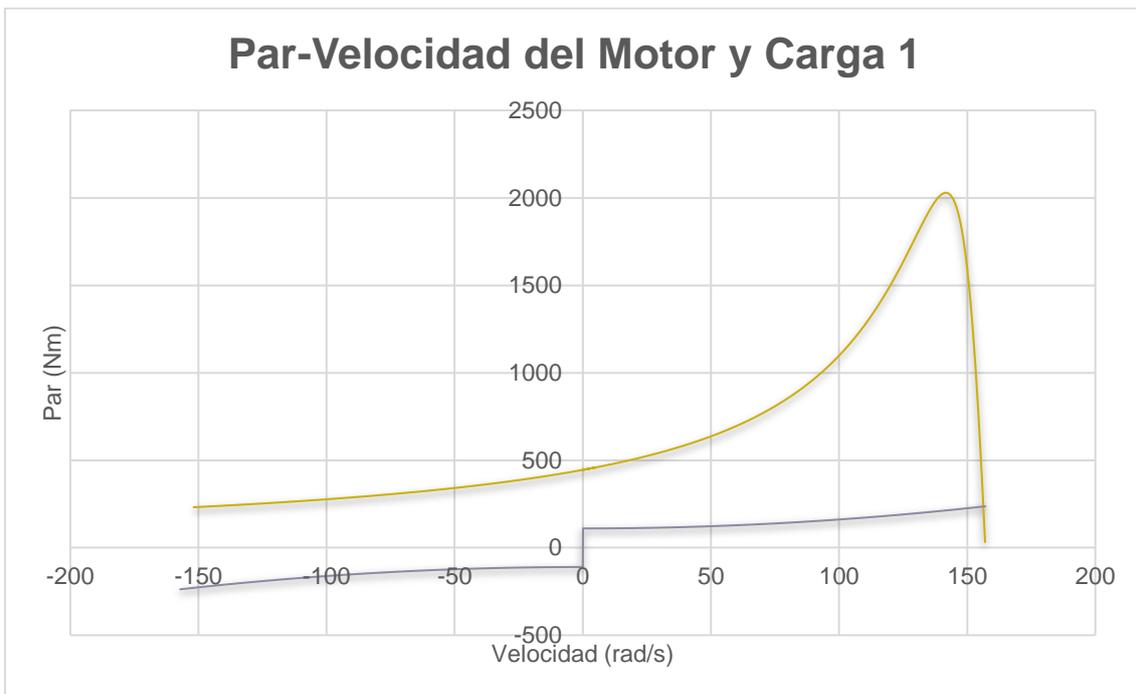


Figura 9.3: Curva Par-Velocidad del Motor y la Carga 1

Obtenemos que la velocidad en el punto de la intersección es de 156,35 rad/s o 1493 revoluciones por minuto.

El par correspondiente a esa velocidad tiene un valor de 235,58 Nm. Este dato se obtiene sustituyendo la velocidad anterior en cualquiera de las ecuaciones, par motor o par de carga, ya que es el punto intersección y el valor de ambas ecuaciones es equivalente para este dato de velocidad.

### 9.1.2.1 Análisis energético de potencias

Obtenemos los parámetros para esta carga:

$$s_f = \frac{n_s - n_f}{n_s} = \frac{1500 - 1493}{1500} = 0,00467$$

$$R'_c = R'_2 \cdot \left( \frac{1}{s_f} - 1 \right) = 0,02092 \cdot \left( \frac{1}{0,00467} - 1 \right) = 4,462 \Omega$$

$$I'_f = \frac{V_N}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,03552 + 0,02092 + 4,462)^2 + 0,21^2}} = 50,848 \text{ A}$$

Y a continuación, podemos obtener todas las pérdidas: en el estator, en el hierro, en el rotor y por el rozamiento y ventilación.

$$P_{estator} = m_1 \cdot R_1 \cdot I'_f{}^2 = 3 \cdot 0,03552 \cdot 50,848^2 = 142,705 \text{ W}$$

$$P_{fe} = \frac{m_1 \cdot V_N^2}{R_{fe}} = \frac{3 \cdot 230^2}{450,23} = 352,487 \text{ W}$$

$$P_{rotor} = m_1 \cdot R'_2 \cdot I'_f{}^2 = 3 \cdot 0,02092 \cdot 50,848^2 = 162,268 \text{ W}$$

$$P_{r,v} = B \cdot \omega_f^2 = 0,002985 \cdot 156,35^2 = 72,966 \text{ W}$$

Finalmente, calculamos la potencia mecánica y la potencia útil, definidas de la siguiente manera:

$$P_m = m_1 \cdot R'_c \cdot I'_f{}^2 = 3 \cdot 4,462 \cdot 50,848^2 = 34.609,392 \text{ W}$$

$$P_u = P_m - P_{r,v} = 34.609,392 - 72,966 = 34.536,426 \text{ W}$$

Una vez obtenidos todos los datos de potencias, podemos calcular el rendimiento del motor.

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_{estator} + P_{fe} + P_{rotor} + P_{r,v} + P_u} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = \frac{34.536,426}{142.705 + 352.487 + 162,268 + 72.966 + 34.536,426} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = 97,561$$

## 9.2 Vía Interurbana

### 9.2.1 Parámetros de la Carga

#### 9.2.1.1 Cálculos de Fuerza

##### **Fuerza de rozamiento con el aire:**

$$A_L = -\frac{\rho C_d A_f}{2} = -\frac{1,225 \cdot 0,28 \cdot 3,049}{2} = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$A_L = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

##### **Fuerza de rozamiento con el suelo:**

$$C_L = C_{L0} = -f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = -0,025 \cdot 1966 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 482,162 \text{ N}$$

$$C_L = -482,162 \text{ N}$$

##### **Fuerza debida a la componente del peso en la dirección del movimiento:**

$$C_G = -m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = -1966 \cdot 9,81 \cdot \sin(0) = 0 \text{ N}$$

##### **Expresión de la Fuerza en este tramo:**

$$F_r(v) = A_L \cdot v^2 + C_L + C_G = -0,523 \cdot v^2 - 480,327 - 0$$

$$F_r(v) = -0,523 \cdot v^2 - 482,162 \text{ N}$$

#### 9.2.1.2 Cálculos de Potencia

##### **Expresión de la Potencia:**

$$P(v) = F_r(v) \cdot v$$

##### **Para este tramo:**

La velocidad en este tramo es de 80 km/h, utilizando el cociente de 3,6 obtenemos una velocidad de 22,222 m/s.

$$P(22,222) = F_r(22,222) \cdot 22,222 = (0,523 \cdot 22,222^2 + 482,162) \cdot 22,222 = 16,454 \text{ kW}$$

### 9.2.1.3 Acople Carga-Motor

#### Relaci3n de transmisi3n:

$$r' = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{22,222}{155,404} = 0,143 \text{ m}$$

#### Par resistente del engranaie:

$$P_1 = P_2 + C_E \cdot \omega_n$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta = 16,454 \cdot 0,97 = 15,960 \text{ kW}$$

$$C_E = -\frac{P_1 - P_2}{\omega_n} = -\frac{16454 - 15960}{155,404} = -3,818 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### Coefficientes de Par:

$$A'_L = A_L \cdot r'^3 = -0,523 \cdot 0,143^3 = -1,529 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$C'_L = C'_{L0} = C_L \cdot r' + C_E = -482,162 \cdot 0,143 - 3,818 = -72,124 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$C'_G = C_G \cdot r' = 0 \cdot 0,143 = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### 9.2.1.4 Expresi3n y curva par-velocidad

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot A'_L \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot C'_L + C'_G$$

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-1,529 \cdot 10^{-3}) \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-72,124) + 0$$

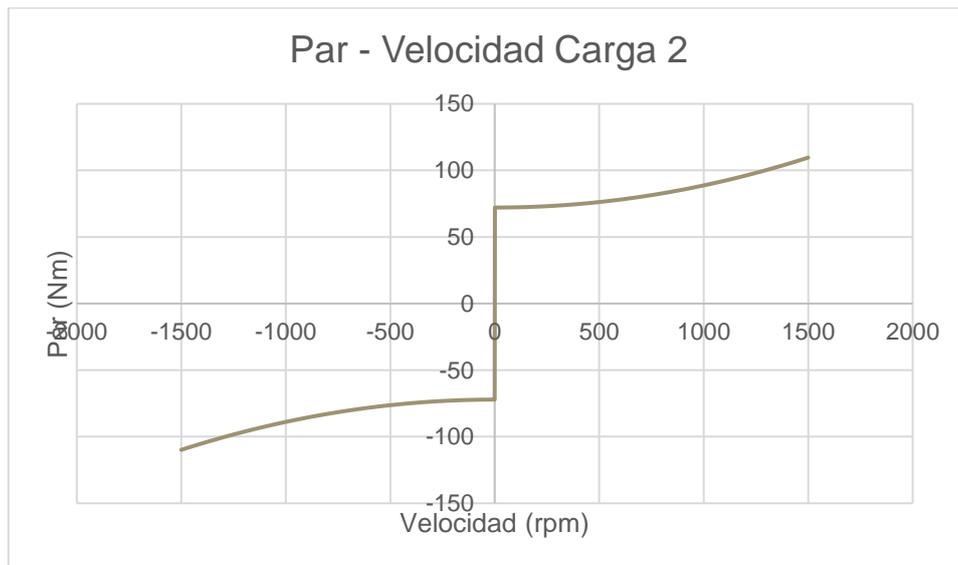


Figura 9.4: Curva Par-Velocidad de la Carga 2

### 9.2.2 Parámetros del punto de funcionamiento

Estudiamos el régimen permanente de cada punto de funcionamiento, donde el par motor es igual al par de la carga (equilibrio). Es decir, cuando  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . O sea, que también tendremos que la diferencia de pares es igual a 0.

$$T_M - [T_L] = 0 \rightarrow T_M = [T_L]$$

Habremos de fijarnos en la intersección de las gráficas de par motor con la de carga, obtenida en el apartado anterior:

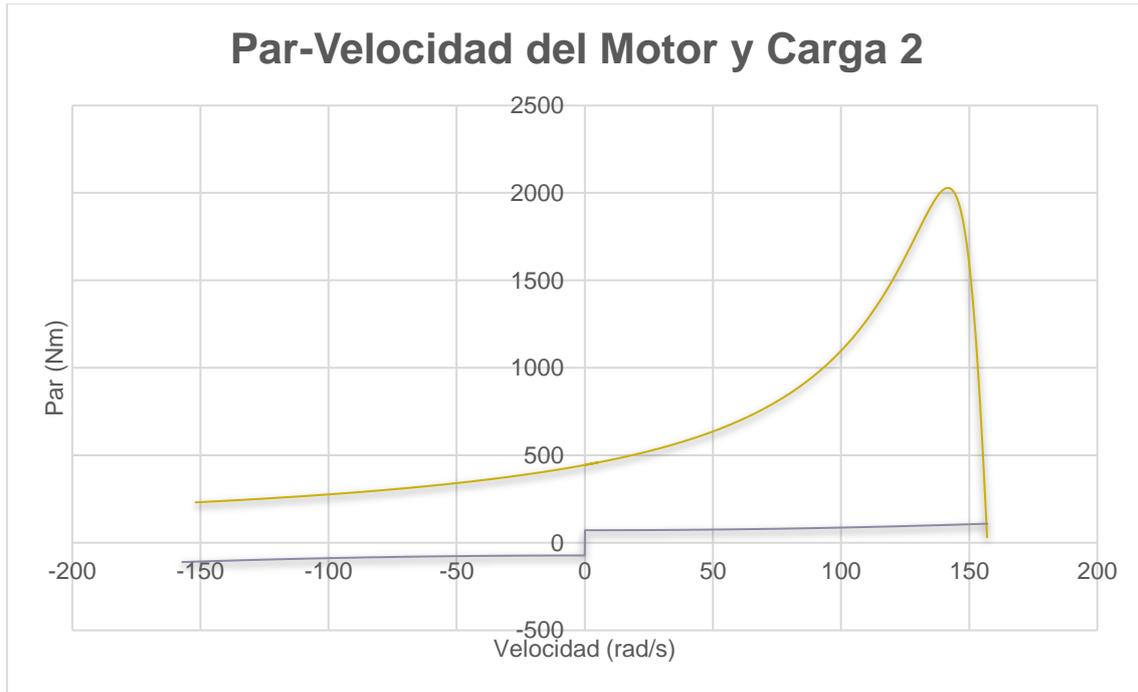


Figura 9.5: Curva Par-Velocidad del Motor y la Carga 2

Obtenemos que la velocidad en el punto de la intersección es de 156,77 rad/s o 1497 revoluciones por minuto.

El par correspondiente a esa velocidad tiene un valor de 109,45 Nm. Este dato se obtiene sustituyendo la velocidad anterior en cualquiera de las ecuaciones, par motor o par de carga, ya que es el punto intersección y el valor de ambas ecuaciones es equivalente para este dato de velocidad.

### 9.2.2.1 Análisis energético de potencias

Obtenemos los parámetros para esta carga:

$$s_f = \frac{n_s - n_f}{n_s} = \frac{1500 - 1497}{1500} = 0,002$$

$$R'_c = R'_2 \cdot \left( \frac{1}{s_f} - 1 \right) = 0,02092 \cdot \left( \frac{1}{0,002} - 1 \right) = 10,439 \Omega$$

$$I'_f = \frac{V_N}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,03552 + 0,02092 + 10,439)^2 + 0,21^2}} = 21,910 \text{ A}$$

Y a continuación, podemos obtener todas las pérdidas: en el estator, en el hierro, en el rotor y por el rozamiento y ventilación.

$$P_{estator} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 0,03552 \cdot 21,910^2 = 51,153 \text{ W}$$

$$P_{fe} = \frac{m_1 \cdot V_N^2}{R_{fe}} = \frac{3 \cdot 230^2}{450,23} = 352,487 \text{ W}$$

$$P_{rotor} = m_1 \cdot R'_2 \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 0,02092 \cdot 21,910^2 = 30,127 \text{ W}$$

$$P_{r,v} = B \cdot \omega_f^2 = 0,002985 \cdot 156,77^2 = 73,358 \text{ W}$$

Finalmente, calculamos la potencia mecánica y la potencia útil, definidas de la siguiente manera:

$$P_m = m_1 \cdot R'_c \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 10,439 \cdot 21,910^2 = 15.033,379 \text{ W}$$

$$P_u = P_m - P_{r,v} = 15.033,379 - 73,358 = 14.960,021 \text{ W}$$

Una vez obtenidos todos los datos de potencias, podemos calcular el rendimiento del motor.

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_{estator} + P_{fe} + P_{rotor} + P_{r,v} + P_u} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = \frac{14.960,021}{51,153 + 352,487 + 30,127 + 73,358 + 14.960,021} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = 96,721$$

## 9.3 Vía Urbana 1

### 9.3.1 Parámetros de la Carga

#### 9.3.1.1 Cálculos de Fuerza

##### **Fuerza de rozamiento con el aire:**

$$A_L = -\frac{\rho C_d A_f}{2} = -\frac{1,225 \cdot 0,28 \cdot 3,049}{2} = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$
$$A_L = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

##### **Fuerza de rozamiento con el suelo:**

$$C_L = C_{L0} = -f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = -0,025 \cdot 1966 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 482,162 \text{ N}$$
$$C_L = -482,162 \text{ N}$$

##### **Fuerza debida a la componente del peso en la dirección del movimiento:**

$$C_G = -m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = -1966 \cdot 9,81 \cdot \sin(0) = 0 \text{ N}$$

##### **Expresión de la Fuerza en este tramo:**

$$F_r(v) = A_L \cdot v^2 + C_L + C_G = -0,523 \cdot v^2 - 480,327 - 0$$
$$F_r(v) = -0,523 \cdot v^2 - 482,162 \text{ N}$$

#### 9.3.1.2 Cálculos de Potencia

##### **Expresión de la Potencia:**

$$P(v) = F_r(v) \cdot v$$

##### **Para este tramo:**

La velocidad en este tramo es de 50 km/h, utilizando el cociente de 3,6 obtenemos una velocidad de 13,889 m/s.

$$P(13,889) = F_r(13,889) \cdot 13,889 = (0,523 \cdot 13,889^2 + 482,162) \cdot 13,889 = 8,098 \text{ kW}$$

#### 9.3.1.3 Acople Carga-Motor

##### **Relación de transmisión:**

$$r' = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{13,889}{155,404} = 0,0894 \text{ m}$$

##### **Par resistente del engranaje:**

$$P_1 = P_2 + C_E \cdot \omega_n$$
$$P_2 = P_1 \cdot \eta = 8,098 \cdot 0,97 = 7,855 \text{ kW}$$

$$C_E = -\frac{P_1 - P_2}{\omega_n} = -\frac{8098 - 7855}{155,404} = -1,563 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### Coefficientes de Par:

$$A'_L = A_L \cdot r'^3 = -0,523 \cdot 0,0894^3 = -3,734 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$C'_L = C'_{L0} = C_L \cdot r' + C_E = -482,162 \cdot 0,0894 - 1,563 = -44,655 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$C'_G = C_G \cdot r' = 0 \cdot 0,0894 = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### 9.3.1.4 Expresi3n y curva par-velocidad

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot A'_L \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot C'_L + C'_G$$

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-3,734 \cdot 10^{-4}) \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-44,655) + 0$$

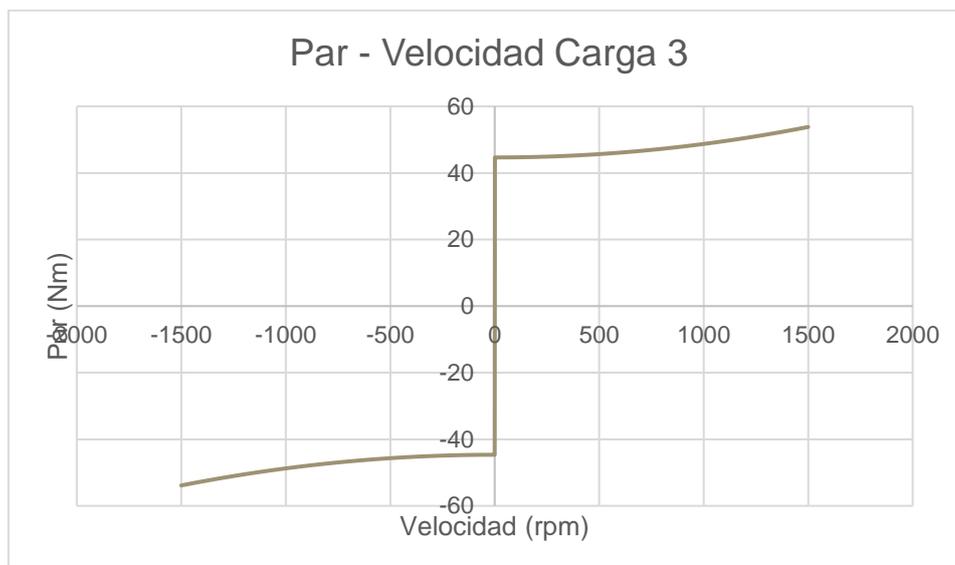


Figura 9.6: Curva Par-Velocidad de la Carga 3

### 9.3.2 Paràmetres del punt de funcionament

Estudiamos el règim permanent de cada punt de funcionament, donde el par motor es igual al par de la carga (equilibrio). Es decir, cuando  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . O sea, que también tendremos que la diferencia de pares es igual a 0.

$$T_M - [T_L] = 0 \rightarrow T_M = [T_L]$$

Habremos de fijarnos en la intersecci3n de las gràficas de par motor con la de carga, obtenida en el apartado anterior:

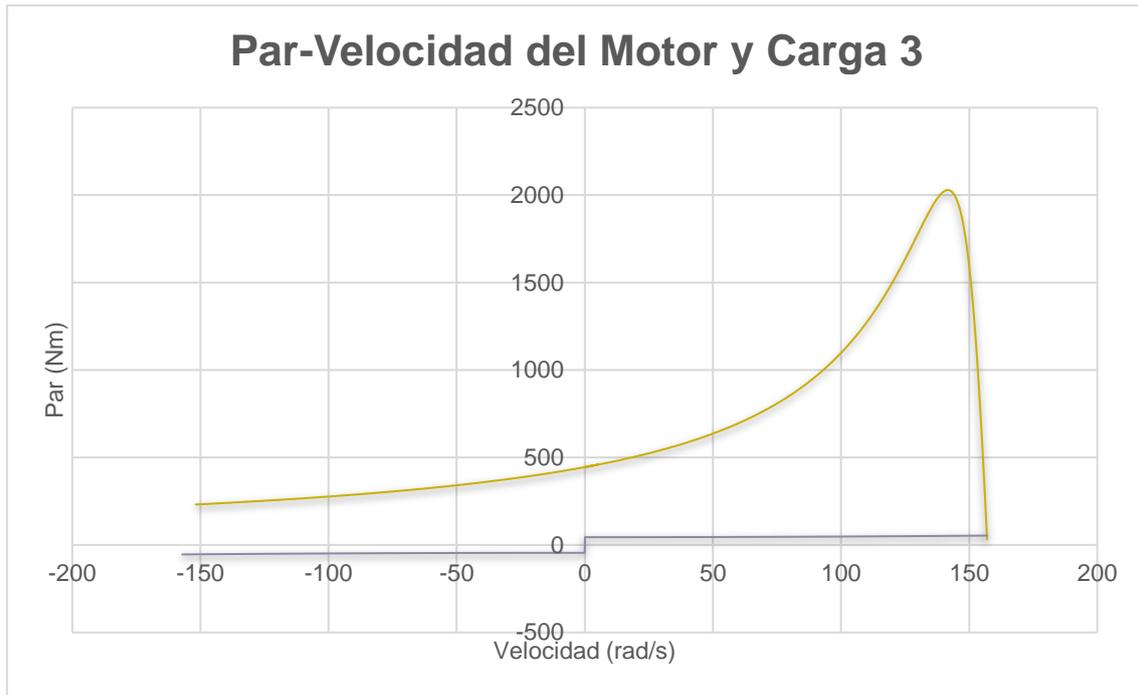


Figura 9.7: Curva Par-Velocitat del Motor y la Carga 3

Obtenemos que la velocidad en el punto de la intersección es de 156,87 rad/s o 1498 revoluciones por minuto.

El par correspondiente a esa velocidad tiene un valor de 53,782 Nm. Este dato se obtiene sustituyendo la velocidad anterior en cualquiera de las ecuaciones, par motor o par de carga, ya que es el punto intersección y el valor de ambas ecuaciones es equivalente para este dato de velocidad.

### 9.3.2.1 Anàlisis energètic de potències

Obtenemos los parámetros para esta carga:

$$s_f = \frac{n_s - n_f}{n_s} = \frac{1500 - 1498}{1500} = 0,00133$$

$$R'_c = R'_2 \cdot \left( \frac{1}{s_f} - 1 \right) = 0,02092 \cdot \left( \frac{1}{0,00133} - 1 \right) = 15,669 \Omega$$

$$I'_f = \frac{V_N}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,03552 + 0,02092 + 15,669)^2 + 0,21^2}} = 14,625 A$$

Y a continuación, podemos obtener todas las pérdidas: en el estator, en el hierro, en el rotor y por el rozamiento y ventilación.

$$P_{estator} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 0,03552 \cdot 14,625^2 = 22,791 \text{ W}$$

$$P_{fe} = \frac{m_1 \cdot V_N^2}{R_{fe}} = \frac{3 \cdot 230^2}{450,23} = 352,487 \text{ W}$$

$$P_{rotor} = m_1 \cdot R_2 \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 0,02092 \cdot 14,625^2 = 13,423 \text{ W}$$

$$P_{r,v} = B \cdot \omega_f^2 = 0,002985 \cdot 156,87^2 = 73,456 \text{ W}$$

Finalmente, calculamos la potencia mecánica y la potencia útil, definidas de la siguiente manera:

$$P_m = m_1 \cdot R'_c \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 15,669 \cdot 14,625^2 = 10.053,854 \text{ W}$$

$$P_u = P_m - P_{r,v} = 10.053,854 - 73,456 = 9.980,399 \text{ W}$$

Una vez obtenidos todos los datos de potencias, podemos calcular el rendimiento del motor.

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_{estator} + P_{fe} + P_{rotor} + P_{r,v} + P_u} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = \frac{9.980,399}{22,791 + 352,487 + 13,423 + 73,456 + 9.980,399} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = 95,574$$

## 9.4 Vía Urbana 2

### 9.4.1 Parámetros de la Carga

#### 9.4.1.1 Cálculos de Fuerza

##### **Fuerza de rozamiento con el aire:**

$$A_L = -\frac{\rho C_d A_f}{2} = -\frac{1,225 \cdot 0,28 \cdot 3,049}{2} = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$A_L = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

##### **Fuerza de rozamiento con el suelo:**

$$C_L = C_{L0} = -f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = -0,025 \cdot 1966 \cdot 9,81 \cdot \cos(5) = -480,327 \text{ N}$$

$$C_L = -480,327 \text{ N}$$

**Fuerza debida a la componente del peso en la dirección del movimiento:**

$$C_G = -m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = -1966 \cdot 9,81 \cdot \sin(5) = -1710,226 \text{ N}$$

**Expresión de la Fuerza en este tramo:**

$$F_r(v) = A_L \cdot v^2 + C_L + C_G = -0,523 \cdot v^2 - 480,327 - 1710,226$$

$$F_r(v) = -0,523 \cdot v^2 - 2190,553 \text{ N}$$

**9.4.1.2 Cálculos de Potencia****Expresión de la Potencia:**

$$P(v) = F_r(v) \cdot v$$

**Para este tramo:**

La velocidad en este tramo es de 30 km/h, utilizando el cociente de 3,6 obtenemos una velocidad de 8,333 m/s.

$$P(8,333) = F_r(8,333) \cdot 8,333 = (0,523 \cdot 8,333^2 + 2190,553) \cdot 8,333 = 18,557 \text{ kW}$$

**9.4.1.3 Acople Carga-Motor****Relación de transmisión:**

$$r' = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{8,333}{155,404} = 0,0536 \text{ m}$$

**Par resistente del engranaje:**

$$P_1 = P_2 + C_E \cdot \omega_n$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta = 18,557 \cdot 0,97 = 18,001 \text{ kW}$$

$$C_E = -\frac{P_1 - P_2}{\omega_n} = -\frac{18557 - 18001}{155,404} = -3,582 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**Coefficientes de Par:**

$$A'_L = A_L \cdot r'^3 = -0,523 \cdot 0,0536^3 = -8,064 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$C'_L = C'_{L0} = C_L \cdot r' + C_E = -480,327 \cdot 0,0536 - 3,582 = -29,339 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$C'_G = C_G \cdot r' = 1710,226 \cdot 0,0536 = 91,709 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**9.4.1.4 Expresión y curva par-velocidad**

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot A'_L \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot C'_L + C'_G$$

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-3,734 \cdot 10^{-4}) \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-44,655) + 91,709$$

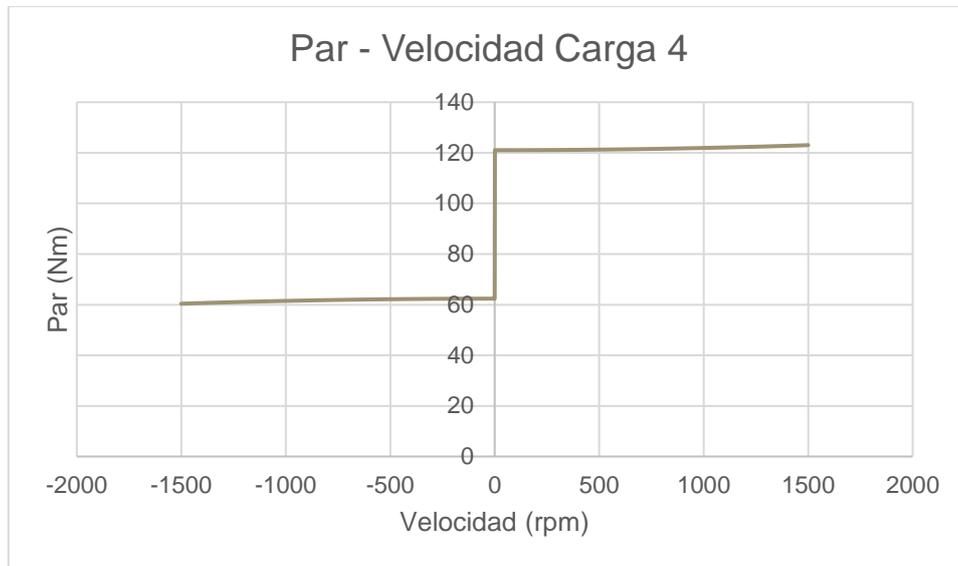


Figura 9.8: Curva Par-Velocitat de la Carga 4

#### 9.4.2 Paràmetres del punt de funcionament

Estudiamos el règim permanent de cada punt de funcionament, donde el par motor es igual al par de la carga (equilibrio). Es decir, cuando  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . O sea, que también tendremos que la diferencia de pares es igual a 0.

$$T_M - [T_L] = 0 \rightarrow T_M = [T_L]$$

Habremos de fijarnos en la intersección de las gráficas de par motor con la de carga, obtenida en el apartado anterior:

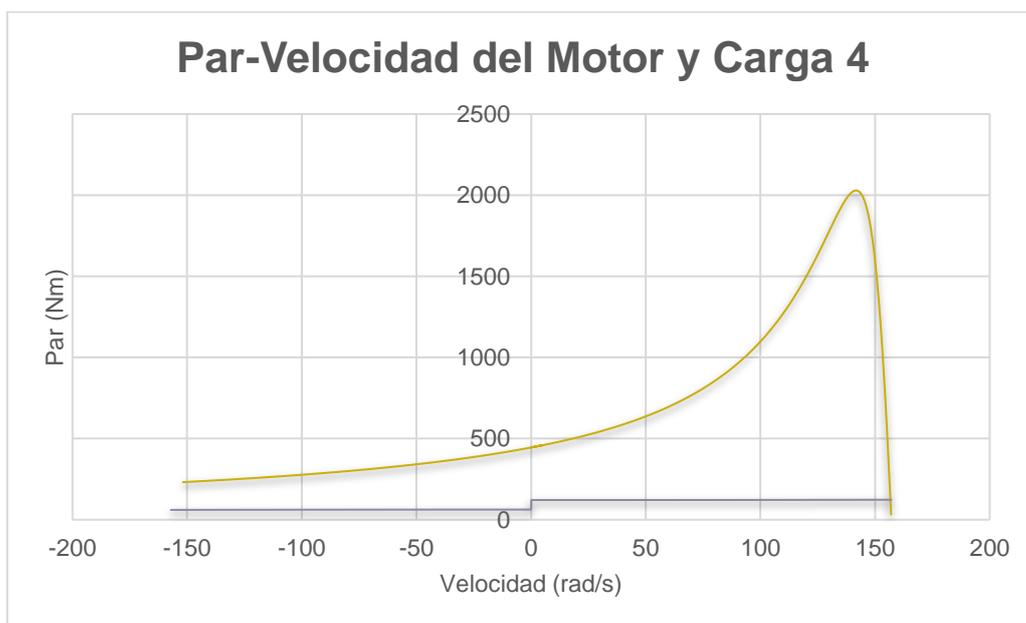


Figura 9.9: Curva Par-Velocitat del Motor y la Carga 3

Obtenemos que la velocidad en el punto de la intersección es de 156,66 rad/s o 1496 revoluciones por minuto.

El par correspondiente a esa velocidad tiene un valor de 123,01 Nm. Este dato se obtiene sustituyendo la velocidad anterior en cualquiera de las ecuaciones, par motor o par de carga, ya que es el punto intersección y el valor de ambas ecuaciones es equivalente para este dato de velocidad.

#### 9.4.2.1 Análisis energético de potencias

Obtenemos los parámetros para esta carga:

$$s_f = \frac{n_s - n_f}{n_s} = \frac{1500 - 1496}{1500} = 0,00267$$

$$R'_c = R'_2 \cdot \left( \frac{1}{s_f} - 1 \right) = 0,02092 \cdot \left( \frac{1}{0,00267} - 1 \right) = 7,824 \Omega$$

$$I'_f = \frac{V_N}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,03552 + 0,02092 + 7,824)^2 + 0,21^2}} = 29,175 \text{ A}$$

Y a continuación, podemos obtener todas las pérdidas: en el estator, en el hierro, en el rotor y por el rozamiento y ventilación.

$$P_{estator} = m_1 \cdot R_1 \cdot I'_f{}^2 = 3 \cdot 0,03552 \cdot 29,175^2 = 90,705 \text{ W}$$

$$P_{fe} = \frac{m_1 \cdot V_N^2}{R_{fe}} = \frac{3 \cdot 230^2}{450,23} = 352,487 \text{ W}$$

$$P_{rotor} = m_1 \cdot R'_2 \cdot I'_f{}^2 = 3 \cdot 0,02092 \cdot 29,175^2 = 53,422 \text{ W}$$

$$P_{r,v} = B \cdot \omega_f^2 = 0,002985 \cdot 156,66^2 = 73,260 \text{ W}$$

Finalmente, calculamos la potencia mecánica y la potencia útil, definidas de la siguiente manera:

$$P_m = m_1 \cdot R'_c \cdot I'_f{}^2 = 3 \cdot 7,824 \cdot 29,175^2 = 19.979,782 \text{ W}$$

$$P_u = P_m - P_{r,v} = 19.979,782 - 73,260 = 19.906,522 \text{ W}$$

Una vez obtenidos todos los datos de potencias, podemos calcular el rendimiento del motor.

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_{estator} + P_{fe} + P_{rotor} + P_{r,v} + P_u} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = \frac{19.906,522}{90,705 + 352.487 + 53,422 + 73,260 + 19.906,522} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = 97,217$$

## 9.5 Vía Urbana 3

### 9.5.1 Parámetros de la Carga

#### 9.5.1.1 Cálculos de Fuerza

##### **Fuerza de rozamiento con el aire:**

$$A_L = -\frac{\rho C_d A_f}{2} = -\frac{1,225 \cdot 0,28 \cdot 3,049}{2} = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$A_L = -0,523 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

##### **Fuerza de rozamiento con el suelo:**

$$C_L = C_{L0} = -f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = -0,025 \cdot 1966 \cdot 9,81 \cdot \cos(-5) = -480,327 \text{ N}$$

$$C_L = -480,327 \text{ N}$$

##### **Fuerza debida a la componente del peso en la dirección del movimiento:**

$$C_G = -m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = -1966 \cdot 9,81 \cdot \sin(5) = 1710,226 \text{ N}$$

##### **Expresión de la Fuerza en este tramo:**

$$F_r(v) = A_L \cdot v^2 + C_L + C_G = -0,523 \cdot v^2 - 480,327 + 1710,226$$

$$F_r(v) = -0,523 \cdot v^2 + 1229,899 \text{ N}$$

#### 9.5.1.2 Cálculos de Potencia

##### **Expresión de la Potencia:**

$$P(v) = F_r(v) \cdot v$$

##### **Para este tramo:**

La velocidad en este tramo es de 30 km/h, utilizando el cociente de 3,6 obtenemos una velocidad de 8,333 m/s.

$$P(8,333) = F_r(8,333) \cdot 8,333 = (0,523 \cdot 8,333^2 - 1229,899) \cdot 8,333 = -9,946 \text{ kW}$$

Observamos que la potencia es negativa, esto quiere decir, que en este tramo de bajada, el motor está actuando como generador, es decir, está regenerando energía.

### 9.5.1.3 Acople Carga-Motor

#### Relación de transmisión:

$$r' = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{8,333}{155,404} = 0,0536 \text{ m}$$

#### Par resistente del engranaje:

$$P_1 = P_2 + C_E \cdot \omega_n$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta = -9,946 \cdot 0,97 = -9,648 \text{ kW}$$

$$C_E = -\frac{P_1 - P_2}{\omega_n} = -\frac{-9946 + 9,648}{155,404} = 1,920 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### Coefficientes de Par:

$$A'_L = A_L \cdot r'^3 = -0,523 \cdot 0,0536^3 = -8,064 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$C'_L = C'_{L0} = C_L \cdot r' + C_E = -480,327 \cdot 0,0536 + 1,92 = -23,837 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$C'_G = C_G \cdot r' = 1710,226 \cdot 0,0536 = 91,709 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### 9.5.1.4 Expresión y curva par-velocidad

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot A'_L \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot C'_L + C'_G$$

$$T_L = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-3,734 \cdot 10^{-4}) \cdot \omega^2 + \frac{|\omega|}{\omega} \cdot (-23,837) - 91,709$$

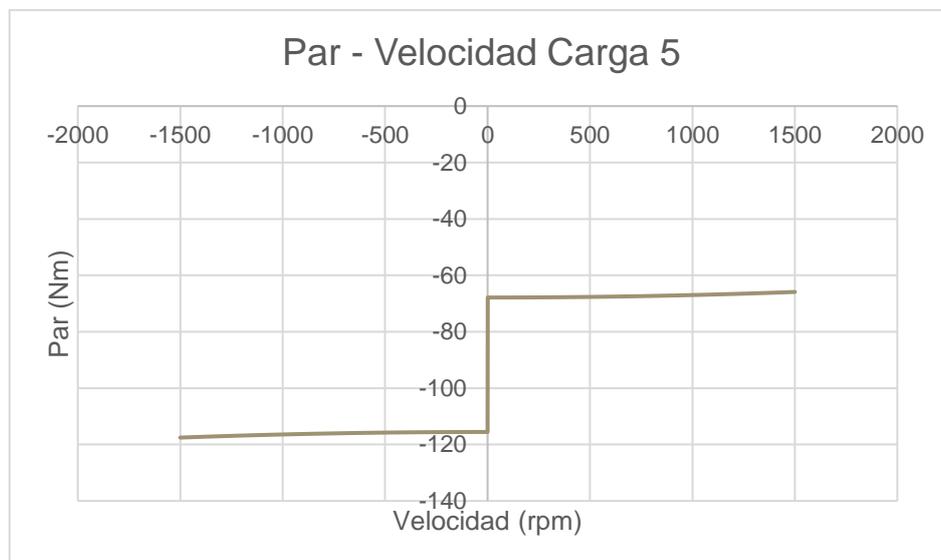


Figura 9.8: Curva Par-Velocidad de la Carga 5

### 9.5.2 Parámetros del punto de funcionamiento

Estudiamos el règimen permanente de cada punto de funcionamiento, donde el par motor es igual al par de la carga (equilibrio). Es decir, cuando  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . O sea, que tambièn tendremos que la diferencia de pares es igual a 0.

$$T_M - [T_L] = 0 \rightarrow T_M = [T_L]$$

Habremos de fijarnos en la intersecciòn de las gráficas de par motor con la de carga, obtenida en el apartado anterior:

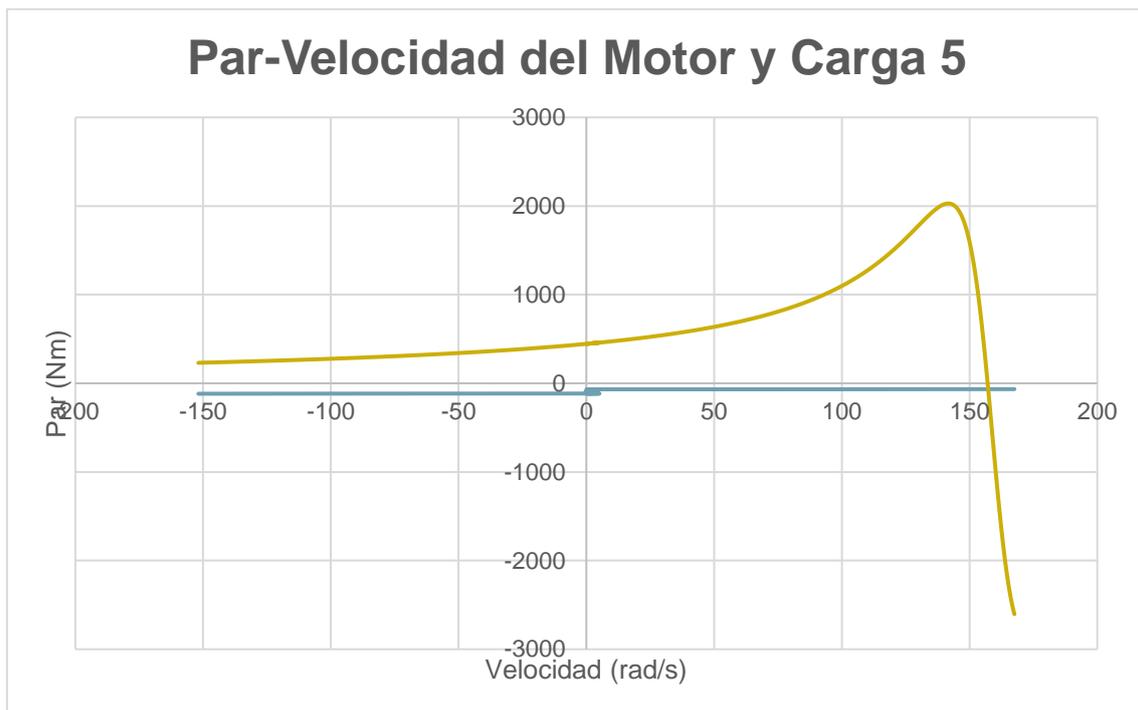


Figura 9.9: Curva Par-Velocidad del Motor y la Carga 5

Obtenemos que la velocidad en el punto de la intersecciòn es de 157,29 rad/s o 1502 revoluciones por minuto. Nótese que hemos tenido que ampliar el rango de la funciòn ya que en bajada el motor gira a mäs revoluciones de lo normal, ademäs, ambas funciones intersecan en el cuarto cuadrante, no en el primero. Es decir, se demuestra que el motor est funcionando como generador.

El par correspondiente a esa velocidad tiene un valor de -65,89 Nm. Este dato se obtiene sustituyendo la velocidad anterior en cualquiera de las ecuaciones, par motor o par de carga, ya que es el punto intersecciòn y el valor de ambas ecuaciones es equivalente para este dato de velocidad.

### 9.5.2.1 Análisis energético de potencias

Obtenemos los parámetros para esta carga:

$$s_f = \frac{n_s - n_f}{n_s} = \frac{1500 - 1502}{1500} = -0,00133$$

$$R'_c = R'_2 \cdot \left( \frac{1}{s_f} - 1 \right) = 0,02092 \cdot \left( \frac{1}{-0,00267} - 1 \right) = -15,711 \Omega$$

$$I'_f = \frac{V_N}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,03552 + 0,02092 - 15,711)^2 + 0,21^2}} = 14,691 \text{ A}$$

Y a continuación, podemos obtener todas las pérdidas: en el estator, en el hierro, en el rotor y por el rozamiento y ventilación.

$$P_{estator} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 0,03552 \cdot 14,691^2 = 22,998 \text{ W}$$

$$P_{fe} = \frac{m_1 \cdot V_N^2}{R_{fe}} = \frac{3 \cdot 230^2}{450,23} = 352,487 \text{ W}$$

$$P_{rotor} = m_1 \cdot R'_2 \cdot I_f'^2 = 3 \cdot 0,02092 \cdot 14,691^2 = 13,545 \text{ W}$$

$$P_{r,v} = B \cdot \omega_f^2 = 0,002985 \cdot 157,29^2 = 73,848 \text{ W}$$

Finalmente, calculamos la potencia mecánica y la potencia útil, definidas de la siguiente manera:

$$P_m = m_1 \cdot R'_c \cdot I_f'^2 = 3 \cdot (-15,711) \cdot 14,691^2 = -10.172,384 \text{ W}$$

$$P_u = P_m + P_{r,v} = -10.172,384 + 73,260 = -10.098,535 \text{ W}$$

Una vez obtenidos todos los datos de potencias, podemos calcular el rendimiento del motor.

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_{estator} + P_{fe} + P_{rotor} + P_{r,v} + P_u} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = \frac{-10.098,535}{90,705 + 352,487 + 53,422 + 73,260 - 10.098,535} \cdot 100 =$$

$$\eta(\%) = 95,617$$

## 9.6 Análisis energético completo

Una vez obtenidos estos datos de pérdidas de potencia y rendimiento en cada punto de funcionamiento y, por tanto, en cada tramo de nuestro ciclo de conducción, es posible calcular cantidad de energía que habría de entregarnos la batería.

Primero, mediante un cálculo sencillo, obtendremos el tiempo empleado en cada tramo:

$$tiempo = \frac{espacio}{velocidad}$$

Como tenemos la velocidad media de cada tramo y el espacio recorrido en ellas, presentamos los resultados en la siguiente tabla-resumen:

| Tipo de Vía     | Longitud (km) | Velocidad Media (km/h) | Tiempo estimado (min) |
|-----------------|---------------|------------------------|-----------------------|
| Autovía         | 2,50          | 120                    | 1,25                  |
| Vía Interurbana | 7,40          | 80                     | 5,55                  |
| Vía Urbana 1    | 4,00          | 50                     | 4,8                   |
| Vía Urbana 2    | 1,90          | 30                     | 3,8                   |
| Vía Urbana 3    | 1,40          | 30                     | 2,8                   |

Tabla 9.1: Resumen de tiempo en cada vía

Una vez conocido el tiempo de cada tramo, se ha de hallar la potencia absorbida por el vehículo. Dato fácil de calcular ya que conocemos el rendimiento de la máquina en cada vía. Esta potencia se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$P_{abs} = \frac{P_u}{\eta}$$

Multiplicando esta potencia por el tiempo de cada tramo, obtendremos la energía total demandada a la batería:

$$E = P_{asb} \cdot t$$

De esta manera obtenemos:

| Tipo de Vía     | Potencia Útil (W) | Rendimiento (%) | Potencia Aborbida (W) | Tiempo Estimado (min) | Energía Demandada (Wh) |
|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Autovía         | 34536,426         | 97,561          | 35399,828             | 1,25                  | 737,496                |
| Vía Interurbana | 14960,021         | 96,721          | 15467,190             | 5,55                  | 1430,715               |
| Vía Urbana 1    | 9980,399          | 95,574          | 10442,588             | 4,8                   | 835,407                |
| Vía Urbana 2    | 19906,522         | 97,217          | 20476,380             | 3,8                   | 1296,837               |
| Vía Urbana 3    | -10098,535        | 95,617          | -10561,443            | 2,8                   | -492,867               |
| <b>Total</b>    | <b>69284,833</b>  | <b>96,538</b>   | <b>71224,543</b>      | <b>18,2</b>           | <b>21604,778</b>       |

Tabla 9.2: Resumen Energía demandada a la batería

# 10. Cálculo de Secciones

---

Para realizar el esquema unifilar, es conveniente determinar las secciones de los cables que porten la corriente de servicio necesaria para el funcionamiento del motor.

Para ello, habremos de centrarnos en dos parámetros fundamentales: la corriente máxima admisible que va a pasar por el cable y la máxima caída de tensión permitida en la línea. Estos parámetros establecerán dos criterios para la elección de la sección del cable. Se han de cumplir ambos.

## 10.1 Máxima Caída de Tensión Permitida

En el caso de los motores eléctricos la normativa indica que existe un máximo del 5% en cuanto a la caída de tensión permitida en la alimentación de estas máquinas, por tanto, sustituiremos este porcentaje en las siguientes fórmulas:

### Líneas Trifásicas:

$$S = \frac{\sqrt{3 \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot \cos(\varphi)}}{\Delta V}$$

### Líneas Monofásicas:

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{\Delta V}$$

Siendo:

- S: la sección del cable, en mm<sup>2</sup>.
- L: la longitud de la línea, en m.
- I: la intensidad máxima admisible, en A.
- cos( $\varphi$ ): el factor de potencia.
- $\rho$ : resistividad del cable a temperatura de funcionamiento.
- $\Delta V$ : la caída de tensión desde el principio hasta el final de la línea, en %.

Una vez conocida la expresión y sabiendo que la línea de la batería al variador de frecuencia (L1) es de corriente continua monofásica, y que del variador de frecuencia al motor (L2) es trifásica de corriente alterna, para realizar el cálculo queda únicamente determinar la intensidad máxima de servicio permanente de cada línea.

$I_{L1}$  será el resultado de dividir la potencia del motor por la tensión nominal de la batería. Como se trata de corriente continua, solo tenemos potencia real, por lo que la intensidad será igual a:

$$I_{L1} = \frac{P_{motor}}{V_{N\ Bateria}} = \frac{75000}{360} = 208,333\ A$$



# 11. Conclusiones

---

El propósito fundamental de este proyecto ha sido analizar las características con las que cuentan los vehículos híbridos y eléctricos actualmente, haciendo un repaso evolutivo desde su creación.

Una vez examinados todos los componentes del tren de potencia y el funcionamiento de éstos, han de remarcar los importantes beneficios sociales y económicos que tienen respecto a los vehículos con motor de combustión. Estas ventajas van desde una movilidad mucho más limpia y eficiente hasta un ahorro económico en combustible diario, convirtiéndose en una tecnología amortizable a corto plazo. Por ello, cada vez más usuarios los adquieren pese a que el futuro inmediato indica que seguirán predominando los vehículos de motor térmico.

Esto se prevé a causa de distintas barreras que frenan la implantación del vehículo eléctrico y que nos embaucan en la etapa de transición de vehículo híbrido en la cual nos encontramos:

- Falta de información y concienciación del usuario. Para corregir esta barrera se están promoviendo cada vez más iniciativas, públicas y privadas que se encargan de informar y ampliar el conocimiento del usuario acerca de esta tecnología.
- Escasa infraestructura existente. Que viendo la progresión creciente que está teniendo esta movilidad, habrá de evolucionar creando más estaciones de carga y desarrollando la red de transporte eléctrico.
- Elevados costes de adquisición de los vehículos eléctricos. Esto es debido a que su producción, aunque creciente, no está implantada del todo. Además, el precio de fabricación es elevado, cosa que perjudica su desarrollo en el mercado ya que el elevado coste de compra provoca una reacción negativa en el usuario.

Hasta que no se consigan superar estas limitaciones, el vehículo eléctrico no será una alternativa aceptada por muchos ciudadanos, a pesar de que sus beneficios van mucho más allá del aspecto económico, como se ha demostrado en el proyecto.

Finalmente, se ha realizado el dimensionamiento del accionamiento electromecánico del vehículo Nissan Leaf. De esta manera, se ha escogido un motor de inducción trifásico para su desarrollo. A través de todos los cálculos realizados mediante los parámetros del circuito eléctrico equivalente, se ha hecho visible su gran potencial, en distintos puntos de funcionamiento, a partir de los datos obtenidos en las gráficas de par-velocidad del ciclo de conducción, probando que la elección del motor ha sido correcta.

## 12. Bibliografía

---

1. “Guía del vehículo eléctrico II” – FENERCOM.
2. “Manual de baterías y acumuladores.” - Fernando Antonio Padrón Jabib.
3. “Gestor de carga de baterías (BMS)” - Gabriel Huerta Illera.
4. “Análisis de vehículos Industriales híbridos y eléctricos. Novedades técnicas y periciales.” - Rodrigo Galán Cenalmor.
5. “Impacto de la incorporación del vehículo eléctrico en la integración de energías renovables en el sistema eléctrico” - Nuria Galindo Martín.
6. “Metamorfosis y renacimiento del sector de la automoción en Cataluña” – Federación CCOO de Industria de Cataluña.
7. Documentación de la asignatura “Accionamientos Electromecánicos” de la Universidad Politécnica de Valencia – Vicente Benlloch Ramos.
8. <https://www.monografias.com/trabajos93/motores-electricos/motores-electricos.shtml#introducca>
9. <https://www.yuasa.es/informacion/automocion-comercial-servicios-nautica/explicacion-de-los-vehiculos-hibridos-y-microhibridos/>
10. <https://www.autonocion.com/funcionamiento-averias-sistema-start-stop-opinion-desconexion/>
11. <https://micocheelectrico.com/coches-electricos-nissan/ficha-tecnica-y-precio-nissan-leaf/>



# Dimensionado del sistema de accionamiento electromecánico de un vehículo eléctrico

---

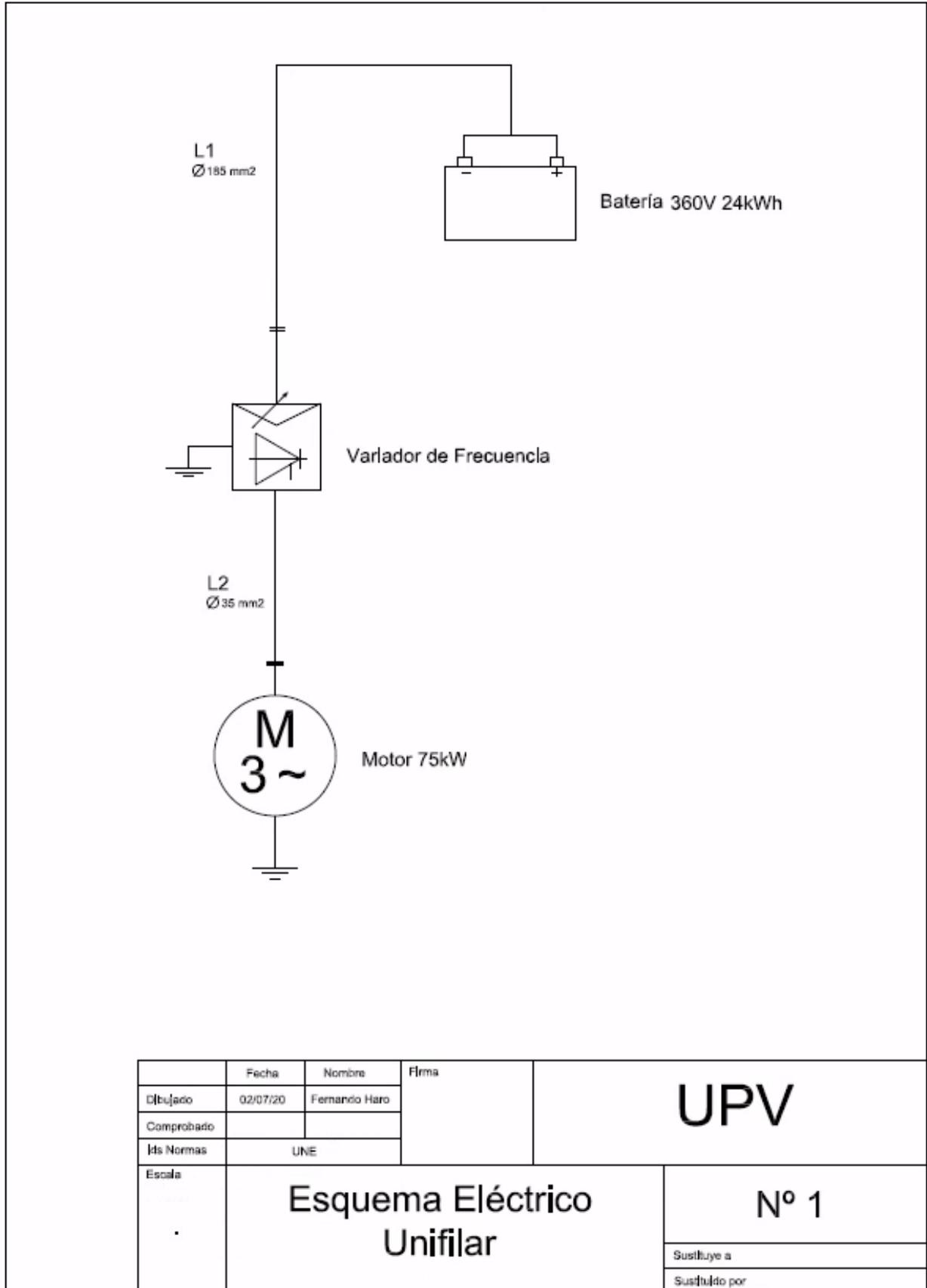
Trabajo Final del Grado de Ingeniería  
Electrónica Industrial y Automática

**Autor: Fernando Haro Javaloyes**  
**Tutor: Vicente Benlloch Ramos**  
**3 de Julio del 2020**

## Planos



# Esquema Unifilar Eléctrico





# Dimensionado del sistema de accionamiento electromecánico de un vehículo eléctrico

---

Trabajo Final del Grado de Ingeniería  
Electrónica Industrial y Automática

**Autor: Fernando Haro Javaloyes**  
**Tutor: Vicente Benlloch Ramos**  
**3 de Julio del 2020**

## **Pliego de Condiciones**

# 13. Pliego de condiciones

---

## 13.1 Condiciones generales

### 13.1.1 Introducción

El presente pliego de condiciones tiene por objeto definir al Contratista, el alcance del trabajo y la ejecución cualitativa del mismo.

El trabajo eléctrico consistirá en la instalación para la alimentación eléctrica en corriente alterna de un motor asíncrono de inducción trifásico. Los trabajos mecánicos son fundamentalmente su construcción y todo lo que conlleva el funcionamiento del motor en cuestión.

El alcance del trabajo del Contratista incluye el diseño, preparación de los planos, diagramas, especificaciones, lista de materiales y requisitos para la adquisición y realización de los diferentes trabajos.

En caso de no producirse contradicciones u omisiones en el presente proyecto, no se podrá suplir la falta sin autorización del proyectista.

Si se modifican los circuitos diseñados o se hace uso indebido, el proyectista no se hace responsable del correcto funcionamiento.

El usuario ha de seguir las condiciones que se exponen en este apartado. EN caso de no hacerlo, el proyectista no se responsabiliza de los daños personales o materiales que se puedan producir con el prototipo.

Los circuitos cumplirán con los requisitos mínimos respecto al proyecto diseñado. Cualquier variación o mejora sustancial en el conjunto tendrá que ser consultada con el proyectista

La contratación de este proyecta se considerará válida cuando las dos partes implicadas, propietario y contratista, se comprometan a concluir las cláusulas del contrato, por el cual tendrán que ser firmados los documentos adecuados en una reunión conjunta al llegar a un acuerdo.

Los servicios de la emprendida contratista se considerarán finalizados desde el mismo momento de la puesta en marcha del aparato, después de la previa comprobación de su funcionamiento.

El cumplimiento de las comprobaciones elementales por parte de la instaladora no será competencia del proyectista, el cual queda fuera de toda responsabilidad derivada del incorrecto funcionamiento del equipo como consecuencia de esta omisión.

### 13.1.2 Reglamentos y normas

Todas las unidades de obra se ejecutarán cumpliendo las prescripciones indicadas en los Reglamentos de Seguridad e Higiene en el Trabajo y Normas Técnicas de obligado cumplimiento para este tipo de instalaciones, tanto de ámbito comunitario, nacional, autonómico como municipal.

Los permisos de carácter obligatorio necesarios para llevar a cabo la obra o la utilización de ésta se tendrán que obtener de la empresa contratante, quedando la emprendida contratista, al margen de todas las consecuencias derivadas.

Todos los aparatos e instrumentos usados tendrán que estar homologados. Además, los instrumentos de medida deberán tener a disposición sus correspondientes certificados de calibrado.

### 13.1.3 Materiales

Todos los materiales empleados serán de primera calidad. Cumplirán las especificaciones técnicas pertinentes. Tendrán las características indicadas en las normas técnicas generales y se ajustarán a las de la compañía.

Una vez adjudicada la obra definitivamente y antes de iniciarse ésta, el Contratista presentará al Técnico Director los catálogos, cartas muestra, certificados de garantía o de homologación de los materiales que vayan a emplearse. No podrán utilizarse materiales que no hayan sido aceptados por el Técnico Director.

### 13.1.4 Ejecución de las obras

#### 13.1.4.1 Comienzo

El contratista dará comienzo a la obra en el plazo que figure en el contrato establecido con la Propiedad, o en su defecto a los quince días de la adjudicación definitiva o de la firma de contrato.

El contratista está obligado a notificar por escrito o personalmente en forma directa al Técnico Director la fecha de comienzo de los trabajos.

#### 13.1.4.2 Plazo de ejecución

La obra se ejecutará en el plazo que se estipule en el contrato suscrito con la Propiedad o en su defecto en el que figure en las condiciones de este pliego.

Cuando el Contratista, de acuerdo, con alguno de los extremos contenidos en el presente Pliego de Condiciones, o bien el contrato establecido con la Propiedad, solicite una inspección para poder realizar algún trabajo ulterior que esté condicionado por la misma, vendrá obligado a tener preparada para dicha inspección, una cantidad de obra que corresponda a un ritmo normal de trabajo.

Cuando el ritmo de trabajo establecido por el Contratista no sea normal, o bien a petición de una de las partes, se podrá convertir una programación de inspecciones obligatorias de acuerdo con el plan de obra.

#### 13.1.4.3 Libro de Órdenes

El Contratista dispondrá en la obra de un Libro de Órdenes en el que se escribirán las que el Técnico Director estime darle a través del encargado o persona responsable, sin perjuicio de las que le dé por oficio cuando lo crea necesario y que tendrá la obligación de firmar el enterado.

#### 13.1.5 Interpretación y desarrollo del proyecto

La interpretación técnica de los documentos del Proyecto corresponde al Técnico Director. El Contratista está obligado a someter a éste cualquier duda, aclaración o contradicción que circunstancias ajenas, siempre con la suficiente antelación en función de la importancia del asunto.

El Contratista se hace responsable de cualquier error de la ejecución motivado por la omisión de esta obligación y que consecuentemente deberá rehacer a su costa los trabajos que correspondan a la correcta interpretación de Proyecto.

El Contratista está obligado a realizar todo cuanto sea necesario para la buena ejecución de la obra, aun cuando no se halle explícitamente expresado en el Pliego de Condiciones o en los documentos del Proyecto.

El Contratista notificará por escrito o personalmente en forma directa al Técnico Director y con suficiente antelación las fechas en que quedarán preparadas para inspección cada una de las partes de obra para las que se ha indicado la conveniencia de esta o para aquellas que, total o parcialmente, deban posteriormente quedar ocultas. De las unidades de obra que deban quedar ocultas, se tomarán antes de ello, los datos precisos para su medición, a los efectos de liquidación y que sean suscritos por el Técnico Director de hallarlos correctos. De no cumplirse este requisito, la liquidación se realizará en base de los datos o criterios de medición aportados por éste.

#### 13.1.6 Obras complementarias

El Contratista tiene la obligación de realizar todas las obras complementarias que sean indispensables para ejecutar cualquiera de las unidades de obra especificadas en cualquiera de los documentos del Proyecto, aunque en él, no figuren explícitamente mencionadas dichas obras complementarias. Todo ello sin variación del importe contratado.

### 13.1.7 Modificaciones

El Contratista está obligado a realizar las obras que se le encarguen resultantes de modificaciones de proyecto, tanto en aumento como en disminución o simplemente variación, siempre y cuando el importe de las mismas no altere en más o menos de un 25% del valor contratado.

La valoración de las modificaciones se hará de acuerdo con los valores establecidos en el presupuesto entregado por el Contratista y que ha sido tomado como base del contrato. El Técnico Director de obra está facultado para introducir las modificaciones de acuerdo con su criterio, en cualquier unidad de obra, durante la construcción, siempre que cumpla las condiciones técnicas referidas en el Proyecto y de modo que ello no varíe el importe total de la obra.

### 13.1.8 Obra defectuosa

Cuando el Contratista halle cualquier unidad de obra que no se ajuste a lo especificado en el Proyecto o en este Pliego de Condiciones, el Técnico Director podrá aceptarlo o rechazarlo; en primer caso, éste fijará el precio que crea justo con arreglo a las diferencias que hubiera, estando obligado el Contratista a aceptar dicha valoración, en el otro caso se reconstruirá a expensas del Contratista la parte mal ejecutada sin que ello sea motivo de reclamación o ampliación del plazo de ejecución.

### 13.1.9 Medios Auxiliares

Serán de cuenta del Contratista todos los medios y máquinas auxiliares que sean precisas para la ejecución de la obra. En el uso de los mismos estará obligado a hacer cumplir todos los Reglamentos de Seguridad e Higiene en el Trabajo que sea vigente y a utilizar los medios de protección para sus operarios.

### 13.1.10 Conservación de las obras

Es obligación del Contratista la conservación en perfecto estado de las unidades de obra realizadas hasta la fecha de recepción definitiva por la Propiedad, y corren a su cargo los gastos derivados de ello.

### 13.1.11 Recepción de las obras

#### 13.1.11.1 *Recepción provisional*

Una vez terminadas las obras, tendrá lugar la recepción provisional y para ello se practicará en ellas un debido reconocimiento por el Técnico Director y la Propiedad en presencia del Contratista, levantando acta y empezando a transcurrir desde ese día el plazo de garantía si se halla en estado de ser admitida.

De no ser admitida se hará constar en el acta y se darán instrucciones al Contratista para subsanar los defectos observados, fijándose un plazo para ello, expirado el cual, se procederá a un nuevo reconocimiento a fin de proceder a la recepción provisional.

#### *13.1.11.2 Plazo de garantía*

El plazo de garantía será como mínimo de un año, contando desde la fecha de la recepción provisional, o bien el que se establezca en el contrato también contando desde la misma fecha. Durante este periodo queda a cargo del Contratista la conservación de las obras y arreglo de los desperfectos causados por asiento de las mismas por mala construcción

#### *13.1.11.2 Recepción definitiva*

Se realizarán después de transcurrido el plazo de garantía de igual forma que el provisional. A partir de estas fechas cesará la obligación del Contratista a conservar y reparar a su cargo las obras si bien sustituirán las responsabilidades que pudieran tener por defectos ocultos y deficiencias de causa dudosa.

### **13.1.12 Contratación de la empresa**

#### *13.1.12.1 Modo de contratación*

El conjunto de las instalaciones las realizará las empresas contratadas por el Técnico Director.

#### *13.1.12.2 Presentación*

Las empresas seleccionadas presentarán sus proyectos y correspondientes presupuestos en el plazo de una semana.

#### *13.1.12.3 Selección*

La empresa escogida será anunciada la semana siguiente a la conclusión del plazo de entrega. Dicha empresa será escogida de mutuo acuerdo entre Propietario y Director de la obra, sin posible reclamación por parte de las otras empresas concursantes.

### **13.1.13 Fianza**

En el contrato se establecerá la fianza que el Contratista deberá depositar en garantía del cumplimiento del mismo, o se convendrá una retención sobre los pagos realizados a cuenta de obra ejecutada.

De no estipularse fianza en el contrato se entiende que se adoptará como garantía una retención del 5% sobre los pagos a cuenta citados.

En el caso de que el Contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos para ultimar la obra en condiciones contratadas, o a atender la garantía, la Propiedad podrá ordenar ejecutarlas a un tercero, abandonando su importe con cargo a la retención o fianza, sin perjuicio de las acciones legales que tenga derecho la Propiedad si el importe de la fianza no bastase.

La fianza retenida se abonará al Contratista en un plazo no superior a treinta días una vez firmada el acta de recepción definitiva de la obra.

### 13.1.14 Descripción general del montaje

En la elaboración de la obra se han definido una serie de pasos a seguir con riguroso orden sin empezar uno sin finalizar el anterior. A continuación, se detallarán las actividades a realizar.

Estos pasos serían los que seguir para realizar un proyecto como este.

1. Pedido y compra de los instrumentos, sensores, tarjetas de adquisición y buzo, software y por último la computadora con sus periféricos.
2. Montaje del motor.
3. Conexión de los instrumentos.
4. Montaje del banco de pruebas.
5. Aplicación del prototipo y diferentes cargas para aplicarle.
6. Diseñar las pruebas a realizar y aplicarlas.
7. Obtención de los parámetros deseados y características.

## 13.2 Condiciones económicas

### 13.2.1 Abono de la obra

En el contrato se deberá fijar detalladamente la forma y plazos en que se abonarán las obras. Las liquidaciones parciales que puedan establecerse a buena cuenta, sujetos a las certificaciones que resulten de la liquidación final. No suponiendo, dichas liquidaciones, aprobación ni recepción de las obras que comprenden.

Terminadas las obras se procederá a la liquidación final que se efectuará de acuerdo con los criterios establecidos en el contrato.

### 13.2.2 Precios

El Contratista presentará, al formalizarse el contrato, la relación de los precios de las unidades de obra que integran el proyecto, los cuales, de ser aceptados, tendrán valor contractual y se aplicarán a las posibles variaciones que pueda haber.

Estos precios unitarios, se entiende que comprenden la ejecución total de la unidad de obra, incluyendo todos los trabajos aún complementarios y los materiales, así como la parte proporcional de impulsión fiscal, las cargas laborales y otros gastos repercutibles.

El presupuesto no incluye los gastos de tipo energético ocasionados por el proceso de instalación ni por el uso del prototipo. Tampoco incluye las obras que fueran necesarias, las cuales irían a cargo de la empresa contratante.

### 13.2.3 Revisión de los precios

En el contrato se establecerá si el Contratista tiene derecho a revisión de precios y la fórmula a aplicar para calcularla. En defecto de esta última, se aplicará a juicio del Técnico Director alguno de los criterios oficiales aceptados.

### 13.2.4 Penalizaciones

Por retraso en los plazos de entrega de las obras, se podrán establecer tablas de penalización cuyas cuantías y demoras se fijarán en el contrato.

### 13.2.5 Contrato

El contrato se formalizará mediante un documento privado, que podrá elevarse a escritura pública a petición de cualquiera de las partes. Comprenderá la adquisición de todos los materiales, transporte, mano de obra, medios auxiliares para la ejecución de reconstrucción de las unidades defectuosas, la realización de las obras complementarias y las derivadas de modificaciones que se introduzcan durante la ejecución, estas últimas en los términos previstos.

La totalidad de los documentos que componen el Proyecto Técnico de la obra serán incorporados al contrato y tanto el Contratista como la Propiedad deberán firmarlos en testimonio de los que conocen y aceptan.

### 13.2.6 Responsabilidades

El Contratista es el responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el Proyecto y en el contrato. Como consecuencia de ello vendrá obligado a la eliminación de lo mal ejecutado y a su reconstrucción correctamente sin que sirva de excusa el que el Técnico Director haya examinado y reconocido las bases.

El Contratista es el único responsable de todas las contravenciones que él o su personal cometan durante la ejecución de las obras u operaciones relacionadas con las mismas.

También es responsable de los accidentes o daños que por errores, inexperiencia o empleo de métodos inadecuados se produzcan a la propiedad, a los vecinos, o a terceros en general.

El Contratista es el único responsable del incumplimiento de las disposiciones vigentes en la materia laboral respecto de su personal y por tanto, los accidentes que puedan sobrevenir y los derechos que puedan derivarse de ellos.

### 13.2.7 Rescisión del contrato

Se considerarán causas suficientes de rescisión del contrato las siguientes:

- Primera: Muerte o incapacitación del Contratista.
- Segunda: La quiebra del Contratista.
- Tercera: Modificación del proyecto cuando produzca alteraciones en más o menos de un 25% del valor contratado.
- Cuarta: Modificación de las unidades de obra en número superior al 40% del original.
- Quinta: La no iniciación de las obras en el plazo estipulado cuando sea por causas ajenas a la Propiedad,
- Sexta: La suspensión de las obras ya iniciadas siempre que el plazo de suspensión sea mayor a seis meses.
- Séptima: Incumplimiento del plazo de ejecución de la obra sin haberse llegado a completar ésta.
- Octava: Terminación del plazo de ejecución de la obra sin haberse llegado a completar ésta.
- Novena: Actuación de mala fe en la ejecución de los trabajos.
- Décima: Destajar o subcontratar la totalidad o parte de la obra a terceros sin la autorización del Técnico Director y la Propiedad.

### 13.2.8 Liquidación en caso de rescisión del contrato

Siempre que se rescinda el contrato por causas anteriores o bien por acuerdo de ambas partes, se abonará al Contratista las unidades de obra ejecutadas y los materiales acopiados a pie de obra que reúnan las condiciones u sean necesarios para la misma.

Cuando se rescinda el contrato llevará implícito la recepción de la fianza para obtener los posibles gastos de conservación del periodo de garantía y los derivados del mantenimiento hasta la fecha de nueva adjudicación.

### 13.2.9 Cláusula del proyecto

Los estudios y manufacturas realizadas en el presente proyecto se han efectuado exclusivamente por finalidades académicas y en ningún caso se podrá sacar un beneficio económico sin un acuerdo previo con el proyectista.

## 13.3 Condiciones facultativas

### 13.3.1 Normas a seguir

El diseño de la instalación estará de acuerdo con las experiencias o recomendaciones expuestas en la última edición de los siguientes códigos:

- Reglamentos Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) e Instrucciones Complementarias (ITCs).
- Normas UNE
- Normas IEC
- Normas CENELEG
- Normas DIN
- Plan Nacional y Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el trabajo.
- Normas de la Compañía Suministradora de Energía.
- Lo indicado en este Pliego de Condiciones con preferencia a todos los códigos y normas.

### 13.3.2 Personal

El Contratista tendrá al frente de la obra a un encargado con autoridad sobre los demás operarios y conocimientos acreditados y suficientes para la ejecución de la obra. El encargado recibirá, cumplirá y transmitirá las instrucciones y órdenes del Técnico Director de la obra.

El Contratista tendrá en la obra el número y clase de operarios que haga falta para el volumen y la naturaleza de los trabajos que se realicen, los cuales serán de reconocida aptitud y experimentados en el oficio.

El Contratista estará obligado a separar de la obra a aquel personal que, a juicio del Técnico Director, no cumpla con sus obligaciones o realice el trabajo defectuosamente, bien por falta de conocimientos o por obrar de mala fe.

### 13.3.3 Reconocimientos y ensayos previos

Cuando lo estime oportuno, el Técnico Director podrá encargar y ordenar el análisis, ensayo o comprobación de los materiales, elementos o instalaciones, bien sea en fábrica de origen, laboratorios oficiales o en la misma obra, según crea más conveniente, aunque éstos no estén indicados en este pliego.

En el caso de discrepancia, los ensayos o pruebas se efectuarán en el laboratorio oficial que el Técnico Director de obra designe.

Los gastos ocasionados por estas pruebas y comprobaciones serán por cuenta del Contratista.

### 13.3.4 Materiales

Todos los materiales usados cumplirán las especificaciones y tendrán las características indicadas en el proyecto. Además, tendrán que cumplir la calidad indicada y especialmente los elementos de precisión. Aun así, en el caso de que no se encuentre en el mercado algún producto, ya sea porque se ha agotado o porque ya no se fabrica, el operario encargado del montaje tendrá que estar capacitado para sustituirlo por uno similar.

#### 13.3.4.1 Calibraciones

Con el objeto de que el instrumental esté en todo momento en correcto funcionamiento, se tendrá que seguir un programa de calibraciones. El licitador indicará en su oferta el programa de calibraciones previsto, los métodos y los medios que dispone a tal fin. Este programa tendrá que cumplir con las condiciones requeridas sobre garantía y control de calidad de datos establecidos por los organismos nacionales.

### 13.3.5 Ensayos

Antes de la puesta en marcha del sistema eléctrico, el Contratista tendrá que hacer los ensayos adecuados para probar, a la entera satisfacción del Técnico Director de obra, que todo equipo, aparatos y cableado han sido instalados correctamente de acuerdo con las normas establecidas y que están en condiciones satisfactorias de trabajo.

Todos los ensayos serán presenciados por el Ingeniero que representa al Técnico Director de obra.

Los resultados de los ensayos serán pasados en certificados indicando fecha y nombre de la persona a cargo del ensayo, así como categoría profesional.

Los cables, antes de ponerse en funcionamiento, se someterán a un ensayo de resistencia de aislamiento entre las fases y entre fase y tierra, que se hará de la forma siguiente:

Alimentación a motor y cuadro. Con el motor desconectado, medir la resistencia de aislamiento desde el lado de salida del arrancador.

Maniobra del motor. Con los cables conectados a las estaciones de maniobra y a los dispositivos de protección y mando, medir la resistencia de aislamiento entre fases y tierra solamente.

### 13.3.6 Condiciones de ejecución

En este apartado se describirán los procesos a realizar en la fabricación de un prototipo.

#### 13.3.6.1 Encargo y compra del material

La compra de los sensores, instrumentos y aparatos necesarios tendrá que realizarse con suficiente antelación de forma que estén disponibles en el momento en el que se inicie el diseño del software.

#### 13.3.6.2 Ensayos, verificaciones y medidas

Antes de poner en funcionamiento el diseño, se recomienda repasar todas las conexiones para verificar que todo está conectado adecuadamente. También es muy importante mantener una distancia segura del motor, así como que ningún objeto obstaculice la trayectoria realizada por este.

El posible funcionamiento inadecuado del equipo nos puede dar errores en la comunicación. Esto puede ser debido a varias causas que se resumen en los siguientes tres puntos:

- Conexiones defectuosas entre los instrumentos o sensores.
- Instrumentos o sensores defectuosos que, una vez localizados, se sustituirán.
- Algún problema en el diseño del programa.

### 13.3.7 Ensayos de aparamenta

Antes de poner la aparamenta bajo tensión, se medirá la resistencia de aislamiento de cada embarrado entre fases y entre fases y tierra. Las medidas deben repetirse con los interruptores en posición de funcionamiento y los contactos abiertos.

Todo relé de protección que sea ajustable será calibrado y ensayado, usando contactor de ciclos, caja de carga, amperímetro y voltímetro, según se precise. Se dispondrá en lo posible de un sistema de protección selectivo. De acuerdo con esto, los relés de protección se elegirán y coordinarán para conseguir un sistema que permita actuar primero al dispositivo de interrupción más próximo a la falta.

El Contratista preparará curvas de coordinación de los relés y calibrado de éstos para todos los sistemas de protección previstos.

Se comprobarán los circuitos secundarios de los transformadores de intensidad y tensión aplicando corriente o tensión a los arrollamientos secundarios de los transformadores y comprobando que los instrumentos conectados a estos secundarios funcionan.

Todos los interruptores automáticos se colocarán en posición de prueba y cada interruptor será cerrado y disparado desde su interruptor de control. Los interruptores deben ser disparados por accionamiento manual y aplicando corriente a los relés de protección. Se comprobarán todos los enclavamientos.

### 13.3.8 Ensayos del motor

Se medirá la resistencia de aislamiento de los arrollamientos del motor antes y después de conectar los cables de fuerza.

Se comprobará el sentido de desplazamiento de la máquina.

El motor deberá ponerse en marcha sin estar acoplado y se medirá la intensidad consumida.

Después de acoplarse el equipo mecánico accionado por el motor, se volverán a poner en marcha con el equipo mecánico en vacío y se volverá a medir la intensidad.

### 13.3.9 Varios

Se comprobará la puesta a tierra para determinar la continuidad de los cables de tierra y sus conexiones y se medirá la resistencia de los electrodos de tierra. Se comprobarán todas las alarmas del equipo eléctrico para comprobar el funcionamiento correcto de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes.

## 13.4 Condiciones técnicas

### 13.4.1 Generalidades de los equipos eléctricos

El ofertante será el responsable del suministro de los equipos eléctricos. La mínima protección será IP54, según DIN 40050, garantizándose una protección contra depósitos nocivos de polvo y salpicaduras de agua.

Al objeto de no dejar descender la temperatura en el interior de los cuadros eléctricos por debajo de la condensación, se preverá calefacción con termostato a 30 °C con potencia calorífica de 300 W/m<sup>3</sup>, garantizándose una disminución correcta del calor en aquellos de gran volumen. Mínima temperatura de 20 °C.

Se preverán prensaestopas de aireación en las partes inferiores de los armarios. En los armarios grandes, en la parte inferior y superior, para garantizar la mejor circulación del aire.

Asimismo, no se dejará subir la temperatura en la zona de los cuadros eléctricos y de instrumentación por encima de 35 °C por lo que el ofertante deberá estudiar dicha condición, además de la ventilación forzada y termostato ambiental, para que si no los considerara suficiente, prevea el acondicionamiento de aire por refrigeración, integrada en los cuadros o ambiental para la zona donde están situados.

Así pues, todos los armarios incorporarán además como elementos auxiliares propios, los siguientes accesorios:

- Ventilación forzada e independiente del exterior.
- Resistencia de calentamiento.
- Refrigeración, en caso de que se requiera.

- Dispositivo químico-pasivo de absorción de humedad.
- Iluminación interior.
- Seguridad de intrusismo y vandalismo.
- Accesibilidad a todos sus módulos y elementos.

Se tendrán en cuenta las condiciones ambientales de uso. Por ello se aplicará la clasificación 721-2 de polvo, arena, niebla, salina, viento, etc. Según la norma IEC721.

Para determinar los dispositivos de protección en cada punto de la instalación de deberá calcular y conocer:

- La intensidad de empleo en función del factor de potencia, simultaneidad, utilización y factores de aplicación previstos e imprevistos.
- La intensidad de cortocircuito.
- El poder de corte del dispositivo de protección con la aparamenta situado aguas abajo. La selectividad se considerará en cada caso, con otros dispositivos de protección situados aguas arriba.

Se determinará la sección de fase y la sección de neutro para la protección contra sobrecargas verificándose:

- La intensidad que pueda soportar la instalación será mayor que la intensidad de empleo previamente calculada.
- Las caídas de tensión en el punto más desfavorable de instalación serán inferiores a la caída de tensión permitida, considerados los casos más desfavorables, como por ejemplo tener todos los equipos en marcha con las condiciones ambientales extremas.

Además, las secciones de los cables de alimentación general y particular tendrán en cuenta los consumos de las futuras ampliaciones.

Se verificará la relación de seguridad  $V_C/V_L$ , tensión de contacto menor o igual a la tensión límite permitida en los locales MI-BT021, protección contra contactos directos e indirectos.

La protección contra sobrecargas y cortocircuitos se hará, preferentemente, con interruptores automáticos de alto poder de corte de cortocircuito, con un valor de corte de 20 A, y tiempo de corte inferior a 5 ms.

Cuando se empleen fusibles con limitadores de corriente, éstos se adaptarán a las distintas clases de receptores, empleándose para ello los más adecuados, ya sean aM, gG, gL o gT según la norma UNE 21-103.

La protección contra choque eléctrico será prevista, y se cumplirá con las normas UNE 20-383 y la MI-BT021.

La determinación de la corriente admisible en las canalizaciones y su emplazamiento será, como mínimo, según lo establecido en la MI-BT004. La corriente de las canalizaciones será 1,5 veces la corriente admisible.

Las caídas de tensión máximas autorizadas serán según MI-BT017, siendo el máximo, en el punto más desfavorable, el 5%. Esta caída de tensión se calculará considerando la alimentación de todos los aparatos de utilización susceptibles de funcionamiento simultáneo.

Los conductores eléctricos usarán los colores distintivos según las normas UNE, y serán etiquetados y numerados para facilitar su localización e interpretación en los planos y en la instalación.

El ofertante debe detallar en su oferta todos los elementos y equipos eléctricos ofrecidos, indicando el nombre del fabricante.

Además de las especificaciones requeridas y ofrecidas, se debe incluir en la oferta:

- Memorando de los cálculos de carga, de tierra y otros que ayuden a clasificar la calidad de las instalaciones ofertadas.
- Diseños preliminares y planos de los sistemas ofertados.

En los planos se empleará la simbología normalizada en la UNE 20004. Se tenderá a homogeneizar el tipo de esquema, numeración de bornes de entrada y de salida y en general, todos los elementos y medios posibles de forma que facilite el mantenimiento de las instalaciones.

### 13.4.2 Motor eléctrico

El devanado cumplirá con el aislamiento de clase F.

Las formas constructivas cumplirán las normas DIN 42950.

El motor estará equipado como mínimo, con los siguientes equipos:

- Guardamotor, con su protección térmica.
- Interruptor automático diferencial, con protección magnetotérmica.
- Interruptor automático
- Señalización de marcha y disparo térmico.

#### 13.4.2.1 Pruebas de recepción a realizar al motor

Como mínimo se efectuarán las siguientes comprobaciones:

- Ensayo de cortocircuito.
- Ensayo de vacío.
- Ensayo de calentamiento.
- Rendimientos a 0.5, 0.75 y 1 de plena carga.
- Factor de potencia a 0.5, 0.75 y 1 de plena carga.
- Pérdidas globales.
- Par máximo.
- Par inicial o de arranque.

# Dimensionado del sistema de accionamiento electromecánico de un vehículo eléctrico

---

Trabajo Final del Grado de Ingeniería  
Electrónica Industrial y Automática

**Autor: Fernando Haro Javaloyes**  
**Tutor: Vicente Benlloch Ramos**  
**3 de Julio del 2020**

## **Presupuesto**

# 14. Presupuesto

---

## 14.1 Mediciones

### 14.1.1 Tren de potencia

| Código | Descripción                                | Cantidad | Unidad |
|--------|--|----------|--------|
| ML101  | Batería Ion Litio 24kWh                    | 1        | Ud.    |
| ML102  | Sistema de Gestión de baterías             | 1        | Ud.    |
| ML103  | Motor asíncrono de Inducción trifásico     | 1        | Ud.    |
| ML104  | Inversor, Convertidor y Cargador integrado | 1        | Ud.    |

### 14.1.2 Sensores e instrumentación

| Código | Descripción                          | Cantidad | Unidad |
|--------|--------------------------------------|----------|--------|
| ML201  | Célula de Carga                      | 1        | Ud.    |
| ML202  | Transductor de corriente efecto Hall | 1        | Ud.    |
| ML203  | Termopar PT100                       | 1        | Ud.    |
| ML204  | Encoder incremental                  | 1        | Ud.    |
| ML205  | Acelerómetro ATEX 4-20 mA            | 1        | Ud.    |
| ML206  | Multímetro HP34401                   | 1        | Ud.    |

### 14.1.3 Mano de obra

| Código | Descripción   | Cantidad | Unidad |
|--------|---|----------|--------|
| ML301  | Ingeniero Técnico Industrial (diseño y cálculo de la máquina) | 5        | h      |
| ML302  | Ingeniero Industrial (diseño y cálculo de la máquina)         | 5        | h      |
| ML303  | Técnico de Montaje (construcción)                             | 2        | h      |
| ML304  | Ensayo de la máquina  | 2,5      | h      |

## 14.2 Precios Unitarios

### 14.2.1 Tren de Potencia

| Código | Descripción                                | Precio     | Unidad |
|--------|--|------------|--------|
| ML101  | Batería Ion Litio 24kWh                    | 944,00 €   | Ud.    |
| ML102  | Sistema de Gestión de baterías             | 280,00 €   | Ud.    |
| ML103  | Motor asíncrono de Inducción trifásico     | 1.300,00 € | Ud.    |
| ML104  | Inversor, Convertidor y Cargador integrado | 700,00 €   | Ud.    |

### 14.2.2 Sensores e instrumentación

| Código | Descripción                          | Precio   | Unidad |
|--------|--------------------------------------|----------|--------|
| ML201  | Célula de Carga                      | 264,84 € | Ud.    |
| ML202  | Transductor de corriente efecto Hall | 25,09 €  | Ud.    |
| ML203  | Termopar PT100                       | 10,56 €  | Ud.    |
| ML204  | Encoder incremental                  | 137,70 € | Ud.    |
| ML205  | Acelerómetro ATEX 4-20 mA            | 320,00 € | Ud.    |
| ML206  | Multímetro HP34401                   | 370,00 € | Ud.    |

### 14.2.3 Mano de obra

| Código | Descripción   | Precio  | Unidad |
|--------|---|---------|--------|
| ML301  | Ingeniero Técnico Industrial (diseño y cálculo de la máquina) | 30,00 € | h      |
| ML302  | Ingeniero Industrial (diseño y cálculo de la máquina)         | 50,00 € | h      |
| ML303  | Técnico de Montaje (construcción)                             | 20,00 € | h      |
| ML304  | Ensayo de la máquina  | 35,00 € | h      |

## 14.3 Presupuesto Parcial

### 14.3.1 Tren de Potencia

| Código | Descripción de partida                     | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
|--------|--|----------|-----------------|--------------|
| ML101  | Batería Ion Litio 24kWh                    | 1        | 944,00 €        | 944,00 €     |
| ML102  | Sistema de Gestión de baterías             | 1        | 280,00 €        | 280,00 €     |
| ML103  | Motor asíncrono de Inducción trifásico     | 1        | 1.300,00 €      | 1.300,00 €   |
| ML104  | Inversor, Convertidor y Cargador integrado | 1        | 700,00 €        | 700,00 €     |
|        |  |          |                 | 3.224,00 €   |

La partida presupuestaria del tren de potencia asciende a TRES MIL DOSCIENTOS VEINTICUATRO euros.

### 14.3.2 Sensores e instrumentación

| Código | Descripción                          | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
|--------|--------------------------------------|----------|-----------------|--------------|
| ML201  | Célula de Carga                      | 1        | 264,84 €        | 264,84 €     |
| ML202  | Transductor de corriente efecto Hall | 1        | 25,09 €         | 25,09 €      |
| ML203  | Termopar PT100                       | 1        | 10,56 €         | 10,56 €      |
| ML204  | Encoder incremental                  | 1        | 137,70 €        | 137,70 €     |
| ML205  | Acelerómetro ATEX 4-20 mA            | 1        | 320,00 €        | 320,00 €     |
| ML206  | Multímetro HP34401                   | 1        | 370,00 €        | 370,00 €     |
|        |                                      |          |                 | 1.128,19 €   |

La partida presupuestaria de los sensores e instrumentación asciende a MIL CIENTO VEINTIOCHO euros y DIECINUEVE céntimos.

### 14.3.3 Mano de obra

| Código | Descripción   | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
|--------|---|----------|-----------------|--------------|
| ML301  | Ingeniero Técnico Industrial (diseño y cálculo de la máquina) | 5        | 30,00 €         | 150,00 €     |
| ML302  | Ingeniero Industrial (diseño y cálculo de la máquina)         | 5        | 50,00 €         | 250,00 €     |
| ML303  | Técnico de Montaje (construcción)                             | 2        | 20,00 €         | 40,00 €      |
| ML304  | Ensayo de la máquina  | 2,5      | 35,00 €         | 87,50 €      |
|        |   |          |                 | 527,50 €     |

La partida presupuestaria de la mano de obra asciende a QUINIENTOS VEINTISIETE euros y CINCUENTA céntimos.

## 14.4 Presupuesto General

| <b>Presupuesto</b> | <b>Descripción</b>         | <b>Precio Total</b> |
|--------------------|----------------------------|---------------------|
| 1.                 | Tren de Potencia           | 3.224,00 €          |
| 2.                 | Sensores e instrumentación | 1.128,19 €          |
| 3.                 | Mano de Obra               | 527,50 €            |
|                    |                            | 4.879,69 €          |

El presupuesto total asciende a una cantidad de CUATRO MIL OCHOCIENTOS SETENTA Y NUEVE euros y SESENTA Y NUEVE céntimos.

