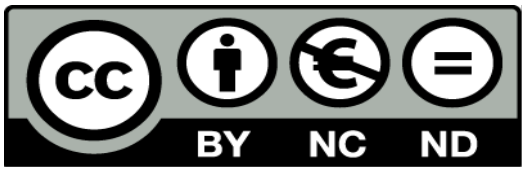
UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TESIS DOCTORAL

Título
Mejora de la eficiencia energética en viviendas domóticas
Autor/es
Juan Ramón Villodas Orte
Director/es
Pedro María Lara Santillán y Luis María López González
Facultad
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Titulación
Departamento
Ingeniería Eléctrica
Curso Académico
2014-2015



Mejora de la eficiencia energética en viviendas domóticas, tesis doctoral de Juan Ramón Villodas Orte, dirigida por Pedro María Lara Santillán y Luis María López González (publicada por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported. Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.

© El autor
© Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2015
publicaciones.unirioja.es
E-mail: publicaciones@unirioja.es

UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TESIS DOCTORAL

Mejora de la eficiencia energética en viviendas domóticas

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ÁREA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

2014

Autor: Juan Ramón Villodas Orte
Línea de investigación: Energías renovables y alternativas
Directores: Pedro Mª Lara Santillán
Luis Mª López González

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores de Tesis Pedro María Lara Santillán y Luis María López González con los que gracias a su confianza, apoyo y dedicación me han permitido dar forma a esta Tesis Doctoral.

A Luis Alfredo Fernández Jiménez que desde el Departamento de Ingeniería Eléctrica me enseñó todo sobre las redes neuronales.

Así mismo, fuera del ámbito académico, agradecer a mi familia, sobre todo a mi mujer, las horas en paralelo que ha dedicado, desinteresada y voluntariosamente en cuidar de nuestra hija y permitirme así dedicar el tiempo necesario para el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

Índice de contenido

1. Descripción 1
   1.1. Título de la Tesis Doctoral 2
   1.2. Autor 2
   1.3. Línea de investigación 2
   1.4. Directores de la Tesis Doctoral 2
2. Estado del arte y antecedentes 3
   2.1. Conceptos 4
   2.2. Configuraciones de las instalaciones domóticas 7
      2.2.1. Sistemas centralizados 7
      2.2.2. Sistemas descentralizados 8
         2.2.2.1. Bus X10 11
         2.2.2.2. Otros buses basados en corrientes portadoras 12
         2.2.2.3. Buses con cableado específico 13
         2.2.2.4. Buses inalámbricos 13
   2.3. Estándares comerciales en domótica 13
   2.4. Elementos de integración de la domótica 18
      2.4.1. Sistemas de confort 18
      2.4.2. Sistemas de seguridad 18
      2.4.3. Comunicaciones 20
      2.4.4. Eficiencia energética 20
         2.4.4.1. Control de la conexión de equipos 21
         2.4.4.2. Apoyo con energías renovables 22
         2.4.4.3. Gestión inteligente de la iluminación y la climatización 22
3. Justificación 29
4. Objetivos 31
   4.1. Objetivo general 32
   4.2. Objetivos específicos 32
5. Metodología 35
   5.1. Planta piloto para la validación del estudio 36
   5.2. Instalación domótica 40
      5.2.1. Tarjetas domóticas 43
         5.2.1.1. Tarjetas base 43
         5.2.1.2. Tarjetas de actuadores 43

5.2.2. Sensores de presencia 43
5.2.3. Gestión de la climatización 43
5.2.3.1. Fancoils 43
5.2.3.2. Calefacción 45
5.2.3.3. Aire acondicionado 46
5.2.4. Interface con el sistema domótico 47
5.3. Algoritmo de control 47
5.4. Recogida de datos 50
6. Modelado mediante redes neuronales 55
6.1. Análisis de datos mediante redes neuronales 57
6.2. Entrenamiento de red MLP 58
6.2.1. Configuración de la red MLP 59
6.2.2. Informes del entrenamiento de la red MLP 61
6.2.3. Evaluación del error de la red MLP 71
6.2.4. Aplicación de la red MLP al año sin control 71
6.3. Entrenamiento de red RBF 73
6.3.1. Configuración de la red RBF 74
6.3.2. Informes del entrenamiento de la red RBF 76
6.3.3. Evaluación del error de la red RBF 84
6.3.4. Aplicación de la red RBF al año sin control 84
6.4. Entrenamiento de red GFF 86
6.4.1. Configuración de la red GFF 86
6.4.2. Informes del entrenamiento de la red GFF 89
6.4.3. Evaluación del error de la red GFF 97
6.4.4. Aplicación de la red GFF al año sin control 97
6.5. Entrenamiento de red TLRN 99
6.5.1. Configuración de la red TLRN 100
6.5.2. Informes del entrenamiento de la red TLRN 102
6.5.3. Evaluación del error de la red TLRN 110
6.5.4. Aplicación de la red TLRN al año sin control 110
6.6. Entrenamiento de red MNN 112
6.6.1. Configuración de la red MNN 113
6.6.2. Informes del entrenamiento de la red MNN 116
6.6.3. Evaluación del error de la red MNN 124
6.6.4. Aplicación de la red MNN al año sin control 124

6.7. Entrenamiento de red PCA 126
6.7.1. Configuración de la red PCA 127
6.7.2. Informes del entrenamiento de la red PCA 129
6.7.3. Evaluación del error de la red PCA 138
6.7.4. Aplicación de la red PCA al año sin control 138
6.8. Entrenamiento de red RN 140
6.8.1. Configuración de la red RN 141
6.8.2. Informes del entrenamiento de la red RN 143
6.8.3. Evaluación del error de la red RN 152
6.8.4. Aplicación de la red RN al año sin control 152
6.9. Entrenamiento de red SOFMN 154
6.9.1. Configuración de la red SOFMN 155
6.9.2. Informes del entrenamiento de la red SOFMN 157
6.9.3. Evaluación del error de la red SOFMN 166
6.9.4. Aplicación de la red SOFMN al año sin control 166
7. Comparativa de resultados 169
7.1. Comparativa entre redes neuronales 169
7.1.1. Error ponderado 169
7.1.2. Sensibilidad de las variables 169
7.1.3. Ahorro energético 171
8. Conclusiones 173
9. Desarrollos futuros 177
10. Referencias bibliográficas 179
11. Nomenclatura 193
12. ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS 195
12.1. Especificaciones técnicas de la instalación domótica 196
12.1.1. Tarjetas domóticas 196
12.1.1.1. Tarjetas base 196
12.1.1.2. Tarjetas de actuadores 203
12.1.2. Sensores 210
12.1.2.1. Sensores de temperatura y humedad 210
12.1.2.2. Sensor de iluminación 210
12.1.2.3. Sensor de consumo eléctrico 211
12.1.2.4. Sensores de presencia 212
12.1.3. Interface con el sistema domótico 213

12.2. Especificaciones técnicas de los equipos de climatización 220
12.2.1. Caldera ROCA VEGA 24 AIFM 220
12.2.2. Enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007 223
12.2.3. Fancoils ROCA RFR 2 y RFR3 228
12.3. Hojas de características de los componentes electrónicos234
12.3.1. Microcontrolador PIC18F2520 234
12.3.2. Transceptor RS485 MAX13088E 241
12.3.3. Optoacoplador MOC3041 247
12.3.4. Optoacoplador PC817 250
12.3.5. Sensor de iluminación BH1750FVI 252
12.3.6. Sensor de temperatura y humedad SHT21 257
12.3.7. Serial UART Interface Module DLP-USB232M 261
12.3.8. Pasarela Ethernet-Serie DIGI Connect ME 266

Índice de tablas

Tabla 1. Domótica: Especificaciones y estándares de red. Alianzas y grupos de trabajo. 16
Tabla 2. Domótica: Especificaciones y estándares de red propietarios. 17
Tabla 3. Orientaciones de las fachadas. 37
Tabla 4. Sensores utilizados para la recogida de datos y sus unidades. 52
Tabla 5. Resumen de la optimización genética en la red MLP. 63
Tabla 6. Variables del informe y su significado. 63
Tabla 7. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MLP al grupo de entrenamiento. 64
Tabla 8. Variables del informe y su significado. 65
Tabla 9. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MLP al grupo de validación cruzada. 66
Tabla 10. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MLP al grupo de test. 67
Tabla 11. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red MLP. 68
Tabla 12. Resumen de la optimización genética en la red RBF. 77
Tabla 13. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RBF al grupo de entrenamiento. 78
Tabla 14. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RBF al grupo de validación cruzada. 79
Tabla 15. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RBF al grupo de test. 80
Tabla 16. Valores de sensibilidad de salida frente a las variables de entrada para la red RBF. 81
Tabla 17. Resumen de la optimización genética en la red GFF. 90
Tabla 18. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red GFF al grupo de entrenamiento. 91
Tabla 19. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red GFF al grupo de validación cruzada. 92
Tabla 20. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red GFF al grupo de test. 93
Tabla 21. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red GFF. 94
Tabla 22. Resumen de la optimización genética en la red TLRN. 103
Tabla 23. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red TLRN al grupo de entrenamiento. 104
Tabla 24. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red TLRN al grupo de validación cruzada. 105

Tabla 25. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red TLRN al grupo de test. 106
Tabla 26. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red TLRN. 107
Tabla 27. Resumen de la optimización genética en la red MNN. 117
Tabla 28. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MNN al grupo de entrenamiento. 118
Tabla 29. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MNN al grupo de validación cruzada. 119
Tabla 30. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MNN al grupo de test. 120
Tabla 31. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red MNN. 121
Tabla 32. Resumen de la optimización genética en la red PCA. 131
Tabla 33. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red PCA al grupo de entrenamiento. 132
Tabla 34. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red PCA al grupo de validación cruzada. 133
Tabla 35. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red PCA al grupo de test. 134
Tabla 36. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red PCA. 135
Tabla 37. Resumen de la optimización genética en la red RN. 145
Tabla 38. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RN al grupo de entrenamiento. 146
Tabla 39. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RN al grupo de validación cruzada. 147
Tabla 40. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RN al grupo de test. 148
Tabla 41. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red RN. 149
Tabla 42. Resumen de la optimización genética en la red SOFMN. 159
Tabla 43. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red SOFMN al grupo de entrenamiento. 160
Tabla 44. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red SOFMN al grupo de validación cruzada. 161
Tabla 45. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red SOFMN al grupo de test. 162
Tabla 46. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red SOFMN. 163
Tabla 47. Errores ponderados para cada tipo de red neuronal. 169
Tabla 48. Comparativa de la sensibilidad de la salida en función de las variables de entrada para cada red neuronal entrenada. 170

Tabla 49. Resumen del ahorro energético en porcentaje tras la aplicación de las redes neuronales al año sin control 2012. 172
Tabla 50. Especificaciones técnicas caldera ROCA VEGA 24 AIFM. 222
Tabla 51. Descripción de los elementos del panel de control de la caldera ROCA VEGA 24 AIFM. 222
Tabla 52. Características técnicas enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007. 226
Tabla 53. Capacidades frigoríficas enfriadoras CARRIER Aquasnap Junior 30RA. 228
Tabla 54. Especificaciones técnicas de los Fancoils ROCA serie RFR. 229
Tabla 55. Potencias frigoríficas de los Fancoils ROCA serie RFR. 230
Tabla 56. Potencias caloríficas de los Fancoils ROCA serie RFR 232
Tabla 57. Características de los microcontroladores de la familia PIC18F2520. 235
Tabla 58. Descripción de los pines de Entrada/Salida del microcontrolador PIC18F2520. 240
Tabla 59. Descripción de pines de entrada salida del transceptor RS485 MAX13088E. 245
Tabla 60. Tablas de funciones del transceptor RS485 MAX13088E. 246

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Elementos de integración de la domótica. 5
Ilustración 2. Configuración domótica centralizada. 8
Ilustración 3. Configuración domótica descentralizada. 10
Ilustración 4. Vista satélite de la situación y orientación de la vivienda. 37
Ilustración 5. Vista de la fachada principal. 38
Ilustración 6. Plano planta primera: Distribución de estancias. 39
Ilustración 7. Detalle ventana PVC con doble acristalamiento. 40
Ilustración 8. Elementos domóticos en planta baja. 41
Ilustración 9. Elementos domóticos en planta primera. 42
Ilustración 10. Fancoil. Vista exterior. 44
Ilustración 11. Fancoil. Configuración interna. 44
Ilustración 12. Caldera de gas natural. 45
Ilustración 13. Enfriadora para aire acondicionado. 47
Ilustración 14. Diagrama de flujo del algoritmo de control de persianas. 49
Ilustración 15. Situación en el plano de la primera planta de la estancia a estudio... 50
Ilustración 16. Posición en la fachada de las ventanas de la estancia a estudio. 51
Ilustración 17. Arquitectura de una red MLP. 59
Ilustración 18. Red neuronal con topología MLP. 61
Ilustración 19. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red MLP. 62
Ilustración 20. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red MLP. 63
Ilustración 21. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal MLP. 64
Ilustración 22. Informe gráfico de la aplicación de la red MLP al grupo de validación cruzada. 65
Ilustración 23. Informe gráfico de la aplicación de la red MLP al grupo de test. 66
Ilustración 24. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red MLP. 67
Ilustración 25. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red MLP. 68
Ilustración 26. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red MLP. 69
Ilustración 27. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red MLP. 69
Ilustración 28. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red MLP. 70
Ilustración 29. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red MLP. 70

Ilustración 30. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal MLP simulando el control sobre el sistema. 72
Ilustración 31. Arquitectura de una red RBF. 73
Ilustración 32. Red neuronal con topología RBF. 75
Ilustración 33. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red RBF. 76
Ilustración 34. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación en la red RBF. 77
Ilustración 35. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal RBF. 78
Ilustración 36. Informe gráfico de la aplicación de la red RBF al grupo de validación cruzada. 79
Ilustración 37. Informe gráfico de la aplicación de la red RBF al grupo de test. 80
Ilustración 38. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red RBF. 81
Ilustración 39. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red RBF. 82
Ilustración 40. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red RBF. 82
Ilustración 41. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red RBF. 83
Ilustración 42. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red RBF. 83
Ilustración 43. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red RBF. 84
Ilustración 44. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal RBF simulando el control sobre el sistema. 85
Ilustración 45. Arquitectura de una red GFF. 86
Ilustración 46. Red neuronal con topología GFF. 88
Ilustración 47. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red GFF. 89
Ilustración 48. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red GFF. 90
Ilustración 49. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal GFF. 91
Ilustración 50. Informe gráfico de la aplicación de la red GFF al grupo de validación cruzada. 92
Ilustración 51. Informe gráfico de la aplicación de la red GFF al grupo de test. 93
Ilustración 52. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red GFF. 94

Ilustración 53. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red GFF. 95
Ilustración 54 Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red GFF. 95
Ilustración 55. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red GFF. 96
Ilustración 56. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red GFF. 96
Ilustración 57. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red GFF. 97
Ilustración 58. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal GFF simulando el control sobre el sistema. 98
Ilustración 59. Arquitectura de una red TLRN. 99
Ilustración 60. Red neuronal con arquitectura TLRN. 101
Ilustración 61. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red TLRN. 102
Ilustración 62. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red TLRN. 103
Ilustración 63. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal TLRN. 104
Ilustración 64. Informe gráfico de la aplicación de la red TLRN al grupo de validación cruzada. 105
Ilustración 65. Informe gráfico de la aplicación de la red TLRN al grupo de test. 106
Ilustración 66. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red TLRN. 107
Ilustración 67. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red TLRN. 108
Ilustración 68. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red TLRN. 108
Ilustración 69. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red TLRN. 109
Ilustración 70. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red TLRN. 109
Ilustración 71. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red TLRN. 110
Ilustración 72. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal TLRN simulando el control sobre el sistema. 111
Ilustración 73. Arquitecturas de redes MNN. 112
Ilustración 74. Red neuronal con topología MNN. 115
Ilustración 75. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red MNN. 116

Ilustración 76. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red MNN. 117
Ilustración 77. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal MNN. 118
Ilustración 78. Informe gráfico de la aplicación de la red MNN al grupo de validación cruzada. 119
Ilustración 79. Informe gráfico de la aplicación de la red MNN al grupo de test. 120
Ilustración 80. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red MNN. 121
Ilustración 81. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red MNN. 122
Ilustración 82 Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red MNN. 122
Ilustración 83. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red MNN. 123
Ilustración 84. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red MNN. 123
Ilustración 85. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red MNN. 124
Ilustración 86. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal MNN simulando el control sobre el sistema. 125
Ilustración 87. Arquitectura de una red PCA. 126
Ilustración 88. Red neuronal con arquitectura PCA. 128
Ilustración 89. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red PCA. 130
Ilustración 90. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red PCA. 131
Ilustración 91. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal PCA. 132
Ilustración 92. Informe gráfico de la aplicación de la red PCA al grupo de validación cruzada. 133
Ilustración 93. Informe gráfico de la aplicación de la red PCA al grupo de test. 134
Ilustración 94. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red PCA. 135
Ilustración 95. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red PCA. 136
Ilustración 96 Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red PCA. 136
Ilustración 97. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red PCA. 137
Ilustración 98. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red PCA. 137

Ilustración 99. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red PCA. 138
Ilustración 100. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal PCA simulando el control sobre el sistema. 139
Ilustración 101. Arquitectura de una red RN. 140
Ilustración 102. Red neuronal con topología RN. 142
Ilustración 103. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red RN. 144
Ilustración 104. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red RN. 145
Ilustración 105. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal RN. 146
Ilustración 106. Informe gráfico de la aplicación de la red RN al grupo de validación cruzada. 147
Ilustración 107. Informe gráfico de la aplicación de la red RN al grupo de test. 148
Ilustración 108. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red RN. 149
Ilustración 109. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red RN. 150
Ilustración 110. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red RN. 150
Ilustración 111. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red RN. 151
Ilustración 112. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red RN. 151
Ilustración 113. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red RN. 152
Ilustración 114. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal RN simulando el control sobre el sistema. 153
Ilustración 115. Arquitectura de una red SOFMN. 154
Ilustración 116. Red neuronal con arquitectura SOFMN. 157
Ilustración 117. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red SOFMN. 158
Ilustración 118. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red SOFMN. 159
Ilustración 119. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal SOFMN. 160
Ilustración 120. Informe gráfico de la aplicación de la red SOFMN al grupo de validación cruzada. 161
Ilustración 121. Informe gráfico de la aplicación de la red SOFMN al grupo de test. 162

Ilustración 122. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red SOFMN. 163
Ilustración 123. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red SOFMN. 164
Ilustración 124 Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red SOFMN. 164
Ilustración 125. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red SOFMN. 165
Ilustración 126. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red SOFMN. 165
Ilustración 127. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red SOFMN. 166
Ilustración 128. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal SOFMN simulando el control sobre el sistema. 167
Ilustración 129. Comparativa de la sensibilidad de la salida en función de las variables de entrada para cada red neuronal entrenada. 170
Ilustración 130. Microcontrolador PIC18F2520: Encapsulado y distribución de pines. 197
Ilustración 131. Localización de cajas de registro en planta baja. En fondo verde las que contienen tarjetas domóticas y su interconexión en el bus. 198
Ilustración 132. Localización de cajas de registro en planta primera. En fondo verde las que contienen tarjetas domóticas y su interconexión en el bus. 199
Ilustración 133. Tarjeta domótica: Esquema placa base. 200
Ilustración 134. Tarjeta domótica: PCB placa base. 201
Ilustración 135. Conexión del cableado del bus y los conectores RJ-45. 202
Ilustración 136. Cable de par trenzado utilizado para el bus. 203
Ilustración 137. Tarjeta domótica: Esquema módulo de 2 salidas de activación por optotriac. 204
Ilustración 138. Tarjeta domótica: PCB módulo de 2 salidas de activación por optotriac. 204
Ilustración 139. Tarjeta domótica: Esquema módulo de 4 salidas de activación por optotriac. 205
Ilustración 140. Tarjeta domótica: PCB módulo de 4 salidas de activación por optotriac. 205
Ilustración 141. Tarjeta domótica: Esquema módulo de 2 salidas con activación por relé. 207
Ilustración 142. Tarjeta domótica: PCB módulo de 2 salidas con activación por relé. 208
Ilustración 143. Tarjeta domótica: Esquema módulo de salida de persiana con activación por relé. 209
Ilustración 144. Tarjeta domótica: PCB módulo de salida de persiana con activación por relé. 210

Ilustración 145. Sensor digital integrado doble de temperatura y humedad. 210
Ilustración 146. Sensor de iluminación BH1750FVI. 211
Ilustración 147. Medidor de energía eléctrica. 212
Ilustración 148. Detectores de presencia empleados. 213
Ilustración 149. Software para Windows de control y monitorización de la instalación domótica 214
Ilustración 150. Pasarela Ethernet a serie TTL Digi Connect ME. 215
Ilustración 151. Software para Android de monitorización y control de la instalación domótica 217
Ilustración 152. Menú de configuración de las tarjetas domóticas desde Android. 219
Ilustración 153. Caldera mural estanca de gas natural ROCA VEGA 24 AIFM. 221
Ilustración 154. Panel de control de la caldera ROCA VEGA 24 AIFM. 222
Ilustración 155. Enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007. 223
Ilustración 156. Límites de funcionamiento enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007. 227
Ilustración 157. Presión total disponible enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007. 227
Ilustración 158. Fancoil ROCA serie RFR con ventilador tangencial. 229
Ilustración 159. Curvas de rendimiento en enfriamiento de los Fancoils ROCA serie RFR funcionando a la máxima velocidad. 231
Ilustración 160. Curvas de rendimiento en calentamiento de los aparatos RFR funcionando a la máxima velocidad. 233
Ilustración 161. Distribución de pines en el microcontrolador PIC18F2520. 235
Ilustración 162. Diagrama de bloques del microcontrolador PIC18F2520. 236
Ilustración 163. Configuración y circuito típico de funcionamiento del transceptor RS485 MAX13088E. 246

1. Descripción

A continuación se detallan los datos del título de esta Tesis Doctoral, autor, línea de investigación y directores de la misma.

1.1. Título de la Tesis Doctoral

Mejora de la eficiencia energética en viviendas domóticas.

1.2. Autor

Juan Ramón Villodas Orte.

1.3. Línea de investigación

Energías renovables y alternativas.

1.4. Directores de la Tesis Doctoral

Pedro María Lara Santillán, Luis María López González

2. Estado del arte y antecedentes

En este apartado se hace una revisión bibliográfica de las publicaciones (haciendo referencia a las mismas de acuerdo a la norma APA) que tienen relación inmediata con la investigación que se desarrolla en la presente Tesis Doctoral.

2.1. Conceptos

En el panorama tecnológico actual nos encontramos con tres términos relacionados con la tecnología aplicada a los edificios:

- Domótica: Según el diccionario de la Real Academia Española (Real Academia Española, 2001) se denomina domótica al "Conjunto de sistemas que automatizan las diferentes instalaciones de una vivienda". También según el mismo diccionario se define Automatizar como "Convertir ciertos movimientos corporales en movimientos automáticos o indeliberados". Así surge la domótica en su faceta básica como un sistema que permite al usuario de una vivienda realizar acciones de manera que no sea él mismo quien las ejecute sino un sistema de control en función de unas variables externas o cronológicas (Cook & Das, 2007). Así pues una instalación domótica (Cook, Augusto, & Jakkula, 2009) constará en su forma más básica de una serie de sensores que recogerán información sobre diferentes magnitudes físicas, una o varias unidades de control que procesan la información procedente de los sensores y unos actuadores que serán la salida del sistema. Normalmente una instalación domótica también dispondrá de un interfaz con el usuario el cual permita a éste monitorizar y controlar la instalación domótica. Una instalación domótica integra cuatro elementos fundamentales:

    - Sistemas de confort: Se trata de maximizar la comodidad de los usuarios creando ambientes agradables así como simplificando tareas.

    - Sistemas de seguridad: Integran en la instalación el control de accesos y todo tipo de alarmas, técnicas, anti intrusión, etc., además de la simulación de presencia.

    - Control de la eficiencia energética: Gestiona los elementos de la vivienda para reducir el consumo energético evitando el uso innecesario de recursos u optimizando el momento según tarifas horarias.

- Gestión de las comunicaciones: Los dispositivos conectados al sistema domótico no sólo se comunican entre sí sino que pueden establecer la comunicación con elementos externos al sistema domótico o incluso de la vivienda. Hoy día la comunicación de las instalaciones domóticas con Internet es vital para monitorizar y controlar dicha instalación.

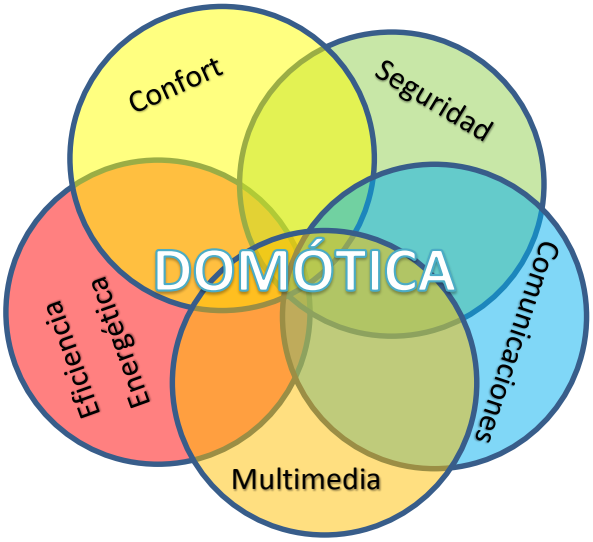


Ilustración 1. Elementos de integración de la domótica.

- Inmótica: Cuando la domótica se integra en edificios del sector terciario o industrial como oficinas, hoteles, etc., se utiliza el término inmótica. Los mismos objetivos buscados por la domótica son los que comparte la inmótica ya que la diferencia con aquélla es exclusivamente el entorno de aplicación. La aplicación de la inmótica a este tipo de edificaciones tiene considerables ventajas no sólo para los usuarios de los mismos sino también para el personal de mantenimiento y seguridad.

- Hogar Digital: En el concepto de hogar digital se integra al concepto de domótica un quinto elemento que es el entretenimiento multimedia. Según el Real Decreto 346/2011, de 11 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento regulador de las infraestructuras comunes de telecomunicaciones para el acceso a los servicios de telecomunicación en el interior de las edificaciones (BOE, 2011) para que una vivienda pueda considerarse hogar digital debe cumplir una

serie de requisitos mínimos que ahí se estipulan y en función de cuáles se cumplan puede estar dentro de uno de los tres niveles: básico, medio o alto.

- Hogar Tele-Asistido y Hogar Accesible: Cuando podemos registrar datos que tienen que ver con la salud personal de los habitantes de un edificio o con adaptaciones específicas para personas con algún tipo de discapacidad (Ding, Cooper, Pasquina, & Fici-Pasquina, 2011), (De Silva, Morikawa, & Petra, 2012), podemos integrar este sexto elemento (Marie Chan, 2009), (Feng, Zhang, Sha, & Wang, 2014), (Suryadevara, Mukhopadhyay, Wang, & Rayudu, 2013).

El objetivo inicial de la domótica ha sido controlar y automatizar tareas en una vivienda como por ejemplo:

- Encender y apagar luces en función de la iluminación exterior y/o la hora del día.
- Apagar luces y cerrar persianas al abandonar la vivienda todos sus ocupantes.
- Cerrar persianas y recoger toldos en situaciones climatológicas adversas.
- Gestionar el riego de jardines.

Este tipo de tareas domóticas básicas se pueden realizar mediante sencillos equipos electrónicos como son los Autómatas Programables. La lógica programada en sus unidades realiza la gestión de las salidas en función de una serie de entradas provenientes de los sensores. La configuración de estas instalaciones es fundamentalmente centralizada ya que el Autómata Programable es la única unidad de control en el sistema en la que confluyen todas las entradas y parten de él todas las salidas.

La domótica está evolucionando incluyendo las nuevas tecnologías en comunicación (internet). El concepto Smart Home (Marie Chan, 2009), (Chan, Campo, Estève, & Fourniols, 2009), (Ding, Cooper, Pasquina, & Fici-Pasquina, 2011) nos lleva al hogar inteligente que es mucho más complejo que la automatización de tareas. Con la implantación del IoT, Internet of Things (El Internet de las cosas) (ITIF, s.f.), el panorama de la domótica se mueve hacia un hogar completamente conectado a internet donde la comunicación con todos los elementos del hogar estará

disponible desde cualquier parte del mundo y en cualquier momento (Kun-kun DU, liang WANG, & HONG, 2013), (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013). La descentralización de la domótica será total ya que cada elemento presentará su propia inteligencia aunque siempre integrándose en el conjunto (Li & Yu, 2011).

El objetivo de las viviendas inteligentes (Smart Home) es aprender las preferencias de los usuarios para adaptarse a sus deseos. Los algoritmos de control de la domótica son un estudio en constante evolución. Algunos están centrados en la eficiencia energética como los de los estudios de (Shaikh P. H., Nor, Nallagownden, & Elamvazuthi, 2013), (Yang & Wang, 2013), (Ippolito, Sanseverino, & Zizzo, 2014) y (Teich, Roessler, Kretz, & Franke, 2014), buscando la optimización de los recursos teniendo en cuenta tanto el confort de los usuarios como los requerimientos de la instalación. En otros casos los algoritmos también se utilizan para reducir el coste de la energía consumida; en este sentido los estudios de (Missaoui, Joumaa, Ploix, & Bacha, 2014) y (Kang, Park, Oh, Noh, & Park, 2014) buscan optimizar el uso de la misma teniendo en cuenta el precio según el momento. En estos estudios últimamente referidos no se consideran variables externas de temperatura o radiación solar.

2.2. Configuraciones de las instalaciones domóticas

Las instalaciones domóticas pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios. Teniendo en cuenta la gestión de control los sistemas domóticos se pueden dividir en:

- Sistemas centralizados.
- Sistemas descentralizados o distribuidos.

2.2.1. Sistemas centralizados

En este primer estadio de la domótica nos encontramos con sistemas cableados centralizados que requieren una instalación específica y, por tanto, de un coste superior a una instalación convencional. La centralización de los sistemas domóticos tiene el inconveniente de largas tiradas de cableado entre sensores y actuadores y la unidad central de control y la posibilidad de que todo el sistema se venga abajo si la unidad central falla.

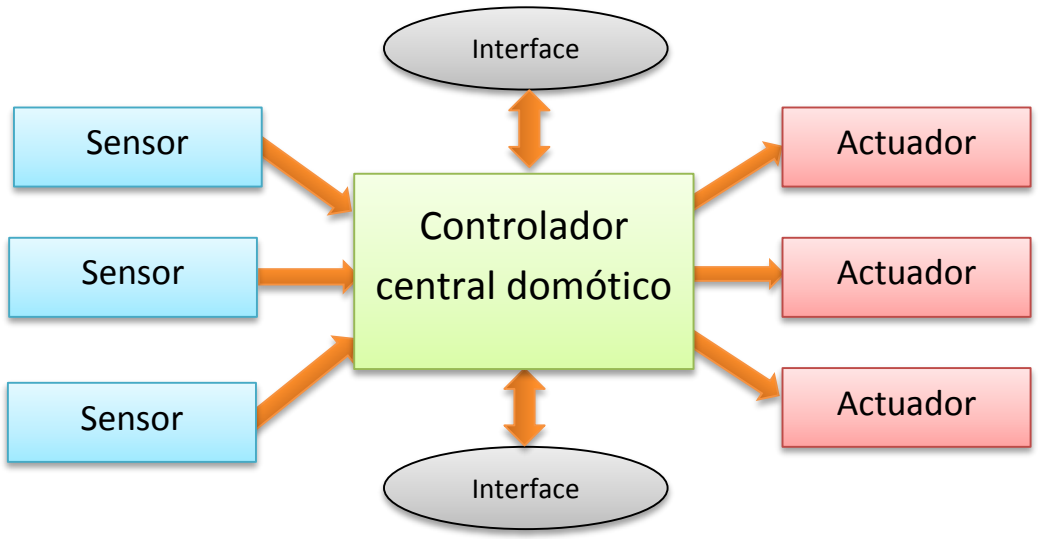


Ilustración 2. Configuración domótica centralizada.

La utilización de ordenadores dedicados y Autómatas Programables en domótica es una solución versátil pero requiere una instalación y configuración individualizada que no es exportable ni directa ni íntegramente de una vivienda a otra encareciendo mucho más su instalación.

Así pues los comienzos de la domótica no fueron muy halagüeños teniendo en cuenta que no ha estado disponible, por razones económicas primeramente, a la mayoría de los usuarios. Las ventajas de disponer de una instalación domótica en la vivienda, debido al coste que ésta supone y teniendo en cuenta los beneficios que aporta, la convirtió en un artículo de lujo.

Una alternativa dentro de los sistemas centralizados son los sistemas como el descrito por (Zamora-Izquierdo, Santa, & Gómez-Skarmeta, 2010) en el que el sistema central de control actúa además como pasarela para integrar diferentes tecnologías domóticas.

2.2.2. Sistemas descentralizados

En los sistemas descentralizados no existe un único dispositivo que toma decisiones sino que son varios repartidos por la instalación. Todos ellos se pueden encargar tanto de recoger la información de los sensores,

procesarla y, si es preciso, enviarla a otros dispositivos, e incluso controlar los actuadores que estén a su cargo. La instalación física se simplifica sustancialmente respecto a los sistemas centralizados y la modificación de la instalación, agregando o eliminando elementos, es más sencilla. Otra de las ventajas es que un fallo en una de las unidades de control no deja inutilizada la instalación sino sólo una parte de ella.

La tendencia en domótica ha seguido el camino de desarrollar instalaciones descentralizadas, ya que presentan muchas ventajas en este tipo de instalaciones frente a las instalaciones centralizadas:

- Mejor respuesta frente a averías ya que no se inutiliza todo el sistema si falla un elemento de control.
- Menor cableado: Todas las conexiones de los sensores y hacia los actuadores no se realizan desde la unidad central, sino que se hacen hacia la unidad de proceso más cercana o la más directamente relacionada y entre las distintas unidades distribuidas sólo se conecta el bus de comunicación (supuesto que no es una comunicación inalámbrica).
- Mayor facilidad para la modificación de la instalación agregando o eliminando elementos.

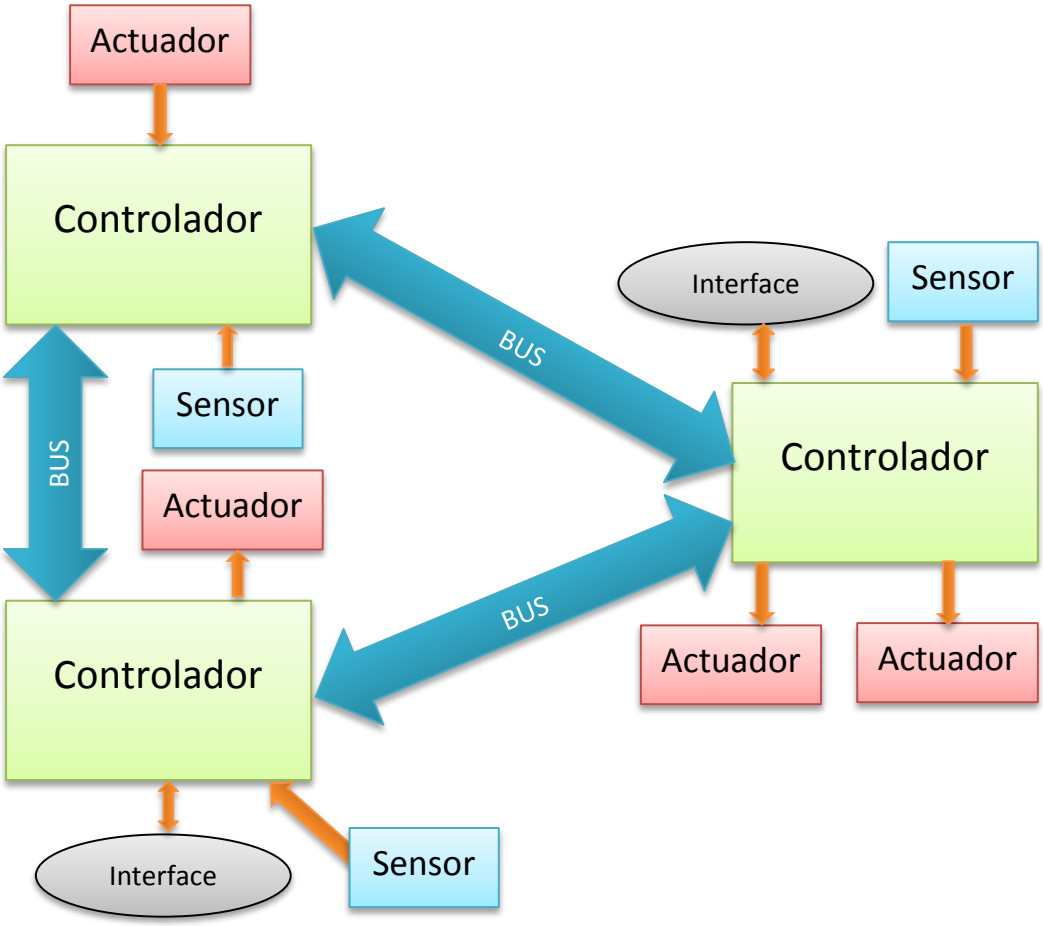


Ilustración 3. Configuración domótica descentralizada.

Una instalación domótica descentralizada o distribuida se compone de una serie de nodos intercomunicados por el bus:

- Nodos de control: Reciben información de sensores y del bus y toman decisiones sobre los actuadores que tengan conectados y/o que estén en el bus en otros nodos de control.
- Nodos de supervisión: Son los sistemas que permiten al usuario comunicarse con la instalación domótica para supervisar los parámetros de la misma así como para actuar sobre los mismos.

- Nodos de comunicaciones: Permiten la comunicación con diferentes sistemas que no son propios de la domótica propiamente dicha.

2.2.2.1. Bus X10

La descentralización de los sistemas domóticos pasó por un primer sistema estandarizado que fue el X10 (X10: Performance and Productivity at Scale, s.f.). El bus X10, basado en la comunicación por ondas portadoras sobre las líneas de tensión de la vivienda (PLC, Power Line Communication), supuso un avance para la domótica en varios sentidos:

- Primero: La descentralización del sistema, puesto que los elementos no dependen de una unidad central. Cada elemento es capaz de recibir y/o transmitir las señales pertinentes del bus.

- Segundo: La instalación no requiere un cableado específico sino que se realiza sobre el cableado ya existente. Tanto la alimentación de los elementos domóticos como el bus de comunicaciones comparten el mismo medio y éste no es otro que el cableado de potencia que ya está instalado en la vivienda. La configuración es muy sencilla y sólo requiere definir la dirección del elemento en el bus antes de conectarlo.

- Tercero, y no menos importante, es un bus abierto, tanto el protocolo como el hardware implicado es de dominio público, lo que significó que múltiples fabricantes pusieran en el mercado sus dispositivos abaratando así considerablemente el coste de los elementos X10, y sobre todo, expandiendo esta tecnología a multitud de hogares.

El bus X10 tiene puntos débiles que hacen que no sea una solución válida en todos los entornos:

- Baja velocidad de transmisión de datos en el bus que está limitada a 50 bps en redes de suministro eléctrico de 50 Hz y a 60 bps en redes de 60 Hz.

- Ausencia de un protocolo que garantice la integridad de la información y su llegada al destino.

- Susceptible a las interferencias electromagnéticas tanto de los dispositivos internos de la vivienda como las procedentes de la acometida de la red eléctrica (ruido eléctrico e interferencias de vecinos que usen el mismo bus).
- Número limitado de elementos del bus de 256 como máximo.
- Los elementos existentes no cumplen con los nuevos requerimientos actuales que van surgiendo en las instalaciones domóticas.

2.2.2.2. Otros buses basados en corrientes portadoras

Tras el auge del bus X10 se plantea el uso de ondas portadoras mejorando el sistema X10 sobre todo en cuanto a la velocidad (Cortes, Rubio, & Valdovinos, 2002). En esta tecnología no se ha desarrollado un bus que pueda considerarse un estándar como lo es X10 lo cual ha limitado su aplicación.

Se han regulado los siguientes rangos de frecuencias utilizables para las comunicaciones por corrientes portadoras:

- De 3 a 95 kHz: Reservado para las empresas de suministro de energía.
- De 95 kHz a 148.5 kHz: Disponible para aplicaciones generales. Este rango está a su vez subdividido en tres bandas:
    - Banda 1: De 95 kHz a 125 kHz para transmisiones sin protocolo de acceso.
    - Banda 2: De 125 kHz a 140 kHz para transmisiones con protocolo de acceso.
    - Banda 3: De 140 kHz a 148.5 kHz para transmisiones sin protocolo de acceso.
- Más allá de 148.5 kHz no está permitido.

En cuanto a la tensión que puede inyectar el transmisor en la línea está regulado de la siguiente manera, comparado con la red eléctrica estándar:

- 116 dBμV: Para uso general.

- 134 dBμV: Para aplicaciones industriales.

2.2.2.3. Buses con cableado específico

El uso de cableado específico para la comunicación de los elementos domóticos en el bus permite mayor velocidad en las transmisiones de datos así como mejor inmunidad al ruido. El principal inconveniente es el requerimiento de una instalación adicional a la instalación normal de la vivienda.

Los principales sistemas domóticos utilizan buses con cableado específico aunque no siempre de forma exclusiva sino combinado con algunos dispositivos inalámbricos.

2.2.2.4. Buses inalámbricos

Los primeros sistemas inalámbricos basados en tecnologías de luz infrarroja han dado paso a los más versátiles de tecnología de radiofrecuencia.

Los buses inalámbricos tienen la principal ventaja de no necesitar un soporte físico reduciendo considerablemente el cableado de la instalación. Así mismo es posible su implantación en viviendas sin preinstalación domótica ya que sus elementos pueden integrarse en los propios sensores y actuadores. El principal inconveniente de esta tecnología radica en la seguridad y en las interferencias que se puedan producir en el espacio radioeléctrico, amén del mayor coste de los dispositivos.

2.3. Estándares comerciales en domótica

El desarrollo de la domótica ha seguido por caminos muy dispares de forma que cada marca de material eléctrico ha creado su propio bus domótico con sus elementos específicos. Tras algunos intentos de regular los protocolos y crear alianzas entre fabricantes han surgido algunos protocolos que intentan llegar al mercado ofreciendo productos compatibles de diferentes fabricantes. Algunos protocolos son abiertos y sus especificaciones están disponibles para cualquiera, otros son abiertos sólo para fabricantes registrados y otros son propietarios de la empresa comercializadora.

En la Tabla 1 y en la Tabla 2 se muestra un resumen de los diferentes protocolos domóticos comerciales, tanto propietarios como los grupos de trabajo que definen los estándares más utilizados, indicándose el medio en el que se basa el bus, si es inalámbrico, cableado sobre par trenzado, cableado sobre cable coaxial, etc.

Domótica: Especificaciones y estándares de red. Alianzas y grupos de trabajo		
Estándar	**Medio**	**Descripción**
OSIRIS rf Wireless Home Automation Residential Gateway and Nodes	RF	Nodos de todos los tipos que combinan su arquitectura de red para cubrir grandes áreas con tan sólo 1 mW de salida, todos ellos están identificados (como una red TCP/IP) y todos son emisores y receptores. El carácter abierto de su hardware y software hacen posible cualquier tipo de instalación.
BatiBUS Club International (BCI)	Par Trenzado	Sensores de unión y actuadores para construir sistemas que controlen HVAC, seguridad física y personal, acceso. Programada su convergencia con EIB y EHS.
Bluetooth	RF	Bluetooth es el nombre de guerra para unas especificaciones embebidas en un chipset de bajo coste, uniones cortas entre PCs portátiles, teléfonos móviles y otros dispositivos portables. El Grupo de Trabajo de Bluetooth está compuesto por empresas líderes en la industria de las telecomunicaciones y del sector de las T.I. que están apostando fuerte para llevar al mercado desarrollos con esta tecnología. Orientado al entorno de las PAN (Personal Area Network), no es adecuada para "Home Automation".
CEBus (Consumer Electronics Bus)	Todos	El Standard CEBus (EIA-600) es un protocolo desarrollado por la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA) para hacer posible la interconexión y comunicación entre dispositivos electrónicos en el hogar.
EIA-776	Par Trenzado	CEBus / EIB Router Communications Standard.
EIB (European Installation Bus)	Par Trenzado	Sensores y actuadores para construir sistemas que controlen HVAC (Acondicionamiento), seguridad física y personal, acceso. Programada su convergencia con EHS y BatiBus.
EHS (European Home System)	Todos	Una colaboración entre industrias y gobiernos Europeos sobre Domótica. Entre alguna de sus misiones la EHSA tiene el objetivo de la armonización y estandarización en Europa de un BUS común (EHS). Programado su convergencia con EIB y BatiBus.

Domótica: Especificaciones y estándares de red. Alianzas y grupos de trabajo		
Estándar	**Medio**	**Descripción**
HAVI (Home Audio Visual Interoperability)	IEEE 1394	HAVi es un standard que asegurara la interoperabilidad entre dispositivos de Audio digital y dispositivos de Video de diferentes fabricantes que podrán conectarse entre ellos formando una red en el hogar del consumidor. Liderado por industrias punteras en el sector del Audio/Video.
HBS (Home Bus System)	Coax/Par Trenzado	Un consorcio de compañías Japonesas soportado por agencias gubernamentales y asociaciones de negocio con el objetivo de especificar estándares de comunicación en dispositivos domóticos, además de asegurar vía pares trenzados y cables coaxiales la unión de éstos con dispositivos telefónicos y audio/video.
HES (Home Electronic System)	Todos	El Home Electronic System (HES) es un standard bajo desarrollo de un grupo de trabajo dirigido por la ISO (International Organization for Standardization) y la IEC (International Electrotechnical Commission) de Ginebra, Suiza. Un primer objetivo de HES es especificar hardware y software con el que cualquier fabricante pudiera ofrecer una versión de producto que fuera operativa en varias redes distintas de automatización del hogar.
HomeAPI	Todos	El Grupo de Trabajo Home API está dedicado a establecer las pautas con una especificación abierta que defina un set standard de servicios de programación y API,s, que permitan el desarrollo de aplicaciones de software para monitorizar y controlar dispositivos domóticos.
Home Plug and Play	Todos	Provee interoperabilidad entre productos con múltiples protocolos de transporte. Visto por el CEBus Industry Council.
HomePNA (Home Phoneline Network Alliance)	Línea telefónica	El Home Phoneline Networking Alliance (HomePNA) es una asociación de industrias líderes trabajando conjuntamente en la adopción de una única y unificada red telefónica que a través del standard sirva para rápidamente sacar al mercado soluciones compatibles de "networking". Haciendo uso de la RTB en cada uno de los hogares.
HomeRF (Home Radio Frequency Working Group)	RF	La misión del grupo de trabajo HomeRF es hacer posible un amplio rango de productos electrónicos de consumo que operen entre sí, estableciendo una especificación abierta para comunicaciones digitales de RF (sin licencia), para PCs y productos electrónicos de consumo en cualquier sitio dentro y alrededor del hogar.

Domótica: Especificaciones y estándares de red. Alianzas y grupos de trabajo		
Estándar	**Medio**	**Descripción**
JINI (The Jini Community)	Todos	La tecnología Jini provee de simples mecanismos que posibilitan a los dispositivos conectarlos en una red donde cada uno de ellos es capaz de aprovechar los servicios que el resto de dispositivos en la misma red son capaces de anunciar, sin previa planificación, ni intervención humana.
LonMark Interoperability Association	Todos	La asociación LonMark tiene la misión de integrar fácilmente dispositivos multi-vendor basados en redes LonWorks, haciendo uso de herramientas y componentes estándar.
OSGI (Open Service Gateway Initiative)	Todos	La especificación OSGi creará un standard abierto entre una "gateway" de servicio que está insertada entre la red exterior y las redes internas.
UPnP (Universal Plug and Play)	Todos	El Universal Plug and Play Forum es un standard de un grupo de industrias que promueven protocolos de red y protocolos de comunicación entre dispositivos.
HomePlug Abril 2000	Línea eléctrica	30 compañías se unen para desarrollar un standard de "Home Networking" por líneas eléctricas.
ZIGBEE Varios (NOV.2001)	RF	Éste puede ser uno de los que van a decir algo en breve en el mundo de la domótica.
WiMAX Worldwide interoperability for Microwave Access Varios	RF	Corporación sin ánimo de lucro que agrupa a compañías promoviendo las "Metropolitan Area Networks", léase también IEEE 802.16. Un buen futuro para pasarelas residenciales no monopolizadas por grandes compañías.
Mobile Broadband Wireless Access MBWA Varios	RF	Grupo de trabajo que piensa en las redes metropolitanas optimizadas para su uso, ubicuo y móvil, no en vano hablan de vehículos a 250 km/h comunicándose.

Tabla 1. Domótica: Especificaciones y estándares de red. Alianzas y grupos de trabajo.

Domótica: Especificaciones y estándares de red propietarios		
Estándar	**Medio**	**Descripción**
HomeConnex Peracom Networks	RF/IR /Coax	HomeConnex es una red de entretenimiento en el hogar que unifica PCs, TVs, audio/video y set-top box en un sistema integrado.
No New Wires Intellon Corp.	Línea eléctrica /RF	Los PLCs de Intellon y sus tecnologías de RF posibilitan comunicaciones de alta velocidad y extienden el uso de internet a productos individuales sin añadir nuevos cables. Incorpora tecnología CEBus.
Lonworks Echelon Corp.	Todos	Redes de control comerciales y para el hogar. Una red LonWorks es un grupo de dispositivos trabajando juntos para sensorizar, monitorizar, comunicar, y de algunas maneras controlar. Es muy parecido a lo que puede ser una LAN de PCs.
Sharewave Sharewave Inc.	RF	ShareWave Digital Wireless es un conjunto de tecnologías que posibilitan conexiones sin cables digitales con capacidad de multimedia en tiempo real entre dispositivos en el hogar. Los sistemas construidos haciendo uso de ShareWave Digital Wireless son capaces de enviar y recibir, video en tiempo real, audio calidad CD, voz, datos, y entradas de usuario de forma inmediata.
X-10 X-10 Inc	Línea eléctrica /RF	El padre de los protocolos, a través de líneas de corriente facilita el control de dispositivos domóticos sin instalación en cualquier casa.
HOMETRONIC RF Honeywell	RF	El primer sistema completo RF, su alta fiabilidad y la flexibilidad que ofrece el no tener que crear infraestructura cableada lo hace idoneo para su expansión (RAPHAEL PROTOCOL).
NFC Sony, Phillips, Nokia	RF Corto alcance	NFC (Near Field Communication) es una asociación no lucrativa de la industria fundada por Nokia, Philips y Sony para avanzar en el uso de la comunicación inalámbrica de corto alcance entre la electrónica de consumo, dispositivos móviles y el PC.
DOMOTIUM Domodesk	Todas	Empleo de un estándar abierto (UPnP) que garantiza la compatibilidad con productos de otros fabricantes y que cuenta entre sus asociados a empresas como SIEMENS, IBM, MICROSOFT, LG, SAMSUNG, etc... Instalación y/o ampliación sencilla: "Conectar y listo" Protocolos estándar de comunicación eficientes y masivamente probados (TCP/IP, DHCP, etc., usados en Internet por millones de equipos) Integración y manejo vía Internet Interfaz de usuario de máxima sencillez.

Tabla 2. Domótica: Especificaciones y estándares de red propietarios.

2.4. Elementos de integración de la domótica

Como se ha referido anteriormente, la domótica implica la integración de cuatro elementos que, aun estando presentes en una vivienda, si no se integran entre sí, la vivienda no puede ser considerada una vivienda domótica. La integración es uno de los principales retos de la domótica puesto que los diferentes sistemas no suelen pertenecer al mismo fabricante y no existe una estandarización. Las pasarelas entre los diferentes sistemas que integran la domótica son el hándicap de estas instalaciones.

2.4.1. Sistemas de confort

Uno de los elementos que primero se integra en cualquier instalación domótica es el confort. Éste puede venir de la mano de diferentes automatizaciones como por ejemplo:

- Control del encendido y apagado de toda la iluminación y persianas desde un solo mando.
- Programar el encendido y apagado de la iluminación y la apertura de persianas (simulación de presencia).
- Automatización del encendido de diferentes dispositivos: Riego, climatización, horno, lavadora, etc.
- Control y monitorización, mediante el teléfono y la televisión, del vídeo portero de la vivienda.
- Uso de mandos a distancia para controlar dispositivos e iluminación.

La complejidad de estos sistemas depende de las exigencias del usuario.

2.4.2. Sistemas de seguridad

Los sistemas de seguridad contemplan varios subsistemas a la vez:

- Control de acceso a la vivienda:
    - Llaves electrónicas: Transponders.

  - Mandos a distancia para puertas.
  - Sistemas de reconocimiento biométrico: Reconocimiento de huella, reconocimiento por voz, por iris, facial, etc.
  - Cerraduras electrónicas: Dispositivos de bloqueo de puertas motorizado o magnético.

- Protección anti-intrusión:
  - Sensores de presencia: Barreras ultrasónicas e infrarrojas, sensores de movimiento por infrarrojos o microondas.
  - Detectores de rotura de cristal y apertura de puertas y ventanas.
  - Alarmas acústicas, visuales y de aviso telefónico.

- Videovigilancia:
  - Cámaras fijas, motorizadas, con visión nocturna.
  - Videograbadores multiplex con grabación digital de imágenes y transmisión de eventos e imágenes a través de internet.

- Alarmas técnicas:
  - Detección de fugas de agua, fugas de gas, humo, incendio, etc.
  - Alertas ante cortes de suministros: agua, gas, electricidad, teléfono, etc.
  - Equipos automáticos de extinción de incendios.

- Monitorización y alarmas de salud:
  - Monitorización de personas con problemas de salud.
  - Monitorización de niños y ancianos.

La integración de los sistemas de seguridad en la domótica es complicado debido a la diversidad de dispositivos pertenecientes a

distintos fabricantes y con protocolos de comunicación incompatibles entre ellos.

2.4.3. Comunicaciones

En el grupo de comunicaciones se contemplan varios tipos:

- Comunicaciones entre las personas: Centralitas telefónicas RTB y de VoIP.
- Comunicaciones entre sistemas: Pasarelas que permiten la comunicación entre sistemas no compatibles directamente entre sí.
- Comunicación de la instalación domótica con el exterior:
    - Control remoto
    - Envío al exterior de las alarmas.

2.4.4. Eficiencia energética

Hoy en día la concienciación para reducir el consumo energético es fundamental para conseguir la reducción de la contaminación del planeta. Uno de los métodos que se viene empleando, (Keyson, Mahmud, de Hoogh, & Luxen, 2013), es informar al usuario del consumo instantáneo que está realizando mostrando éste en valores energéticos, económicos o de impacto ambiental. De esta manera se intenta sensibilizar al usuario haciéndole consciente del consumo que realiza, del coste de éste y/o del grado de contaminación que aporta al medio ambiente.

La tecnología aplicada a la vivienda está siendo una realidad común en la mayoría de las instalaciones actuales. La implantación de la domótica en las viviendas es cada día más común concediendo a los usuarios la doble función de comodidad y ahorro energético. Si bien la intención primera de la domótica ha sido aumentar el confort permitiendo gestionar de manera automática o a distancia las funciones de la vivienda; últimamente se está valorando cada vez más la aplicación de las funciones domóticas para incrementar el ahorro energético.

La eficiencia energética a través de la domótica se puede mejorar a partir de distintas estrategias:

- Limitando el consumo de equipos en franjas horarias de tarificación económica elevada o evitando la simultaneidad que pueda provocar un exceso sobre la potencia máxima contratada, de modo que se reduzcan las pérdidas en el transporte de la energía.

- Desconectando los dispositivos innecesarios en ciertos momentos (p. e.: luces externas en horario diurno, equipos en stand-by, etc.).

- Realizando la gestión inteligente de la iluminación y la climatización teniendo en cuenta el nivel de ocupación de las estancias e incluso la previsión meteorológica, incluso avisando o desconectando los sistemas en el caso de apertura de ventanas.

2.4.4.1. Control de la conexión de equipos

Teniendo en cuenta las tarificaciones de la energía según franja horaria el sistema de control puede restringir la activación de equipos no prioritarios en las horas pico para evitar el mayor coste económico por consumir en tales intervalos horarios. En este tipo de instalaciones puede diferirse el encendido de dispositivos como lavadoras y lavavajillas así como cualquier sistema que utilice dispositivos de acumulación energética (acumuladores térmicos, vehículos recargables, etc.).

Sobre la reducción de costes económicos por la energía consumida en la vivienda podemos encontrarnos con un hecho que, en apariencia, puede parecer contradictorio; ya que es posible encontrar una franja horaria en la que, al ser el precio de la energía inferior a otras franjas, sea más económico consumir mayor cantidad de energía que en otra franja horaria. Estamos hablando en este caso de maximizar el ahorro económico-energético. Siendo así se puede instar al sistema de climatización, por ejemplo, a realizar precalentamientos o pre-enfriamientos en las franjas en las que la energía tiene un coste menor y aun así tener un coste menor por la energía consumida que optimizando el consumo de ésta, funcionando como un sistema de acumulación.

Estudios como los de (Al-Ali, El-Hag, Bahadiri, Harbaji, & Haj, 2011) proponen una comunicación bidireccional entre los suministradores de

energía eléctrica y los consumidores. El consumidor podría consultar el precio de la energía antes de consumirla y proceder de la manera más conveniente seleccionando el momento oportuno en el que activar algunos dispositivos para conseguir un ahorro económico.

2.4.4.2. Apoyo con energías renovables

Otra estrategia para mejorar la eficiencia energética en viviendas consiste en el apoyo como fuente de energía de las energías renovables (Al-Ali, El-Hag, Bahadiri, Harbaji, & Haj, 2011), (Phuangpornpitak & Tia, 2013). Esto supone un elevado coste en la instalación ya que se requiere de equipos que, además de su precio inicial, requieren un mantenimiento continuo. No obstante, se están viendo las ventajas de la creación de la Smart Grid o red inteligente (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, s.f.) para gestionar mejor el consumo y la producción con energías renovables (Kaygusuz, Keles, Alagoz, & Karabiber, 2013), (Batista, Melício, Matias, & Catalão, 2013).

2.4.4.3. Gestión inteligente de la iluminación y la climatización

En el campo del confort, los actuales sistemas domóticos están vinculados, fundamentalmente, al control de la climatización mediante la regulación de los sistemas de calefacción y aire acondicionado para mantener una temperatura confortable para los usuarios. El uso de un único termostato para toda la vivienda es la opción más utilizada y, sin embargo, la menos eficiente.

El control de la climatización individual en cada estancia permite un mayor confort a la vez que un ahorro significativo puesto que sólo es necesaria la actuación del equipo en las estancias que lo requieran y no en toda la vivienda.

El control de la climatización mediante domótica (Rey Martínez & Velasco Gómez, 2006) suele basarse exclusivamente en:

- Programación: Se regula la temperatura de la vivienda variando las consignas térmicas en función de los días de la semana y las horas del día buscando una temperatura de mantenimiento en los momentos en los que la vivienda se supone no va a estar ocupada y modificando la consigna a las temperaturas de confort para las horas de utilización de la vivienda.

- Zonificación: Se utilizan consignas de temperatura distintas para las diversas estancias de la vivienda dejando a una temperatura de mantenimiento las estancias que se suponen no utilizadas y a la temperatura de confort las estancias que estén en uso.

El desarrollo de modelos matemáticos que caractericen las viviendas para la optimización del consumo de los equipos de climatización o HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) no tienen en cuenta la influencia muy potente de la energía solar pasiva (Bălan, Cooper, Chao, Stan, & Donca, 2011).

El uso de la energía solar pasiva no es una novedad en sí ya que existen estudios como los de (Omer, 2006), (Orosa & C.Oliveira, 2008) y (C. Filippín, 2010) en los que se considera el uso de esta energía atendiendo a un diseño especializado en edificios para aprovecharla pero sin tener en cuenta los posibles incrementos en la eficiencia energética que supone la automatización. Algunos autores como (Bălan, Cooper, Chao, Stan, & Donca, 2011) reconocen los beneficios de regular la incidencia solar para evitar el sobrecalentamiento pero sin cuantificar el ahorro que se pudiera conseguir y haciendo hincapié exclusivamente en la recirculación del aire interior.

En el estudio de (Orosa & C.Oliveira, 2008) se tiene en cuenta, sobre todo, el impacto de la energía solar pasiva en función de la permeabilidad de los elementos constructivos de las viviendas. Si bien este aspecto influye en el rendimiento energético, no se considera la regulación de las partes del edificio que pueden controlarse como son las persianas y que regulan la incidencia hacia el interior de la energía solar proyectada.

En la investigación de (C. Filippín, 2010) se han tomado lecturas tanto en invierno como en verano para catalogar el consumo energético y la influencia de la energía pasiva. No se trata de viviendas automatizadas y, por tanto, no se puede maximizar el ahorro que supone el uso de la domótica en estos inmuebles.

En otros casos, como el presentado en (Stavrakakis, Zervas, Sarimveis, & Markatos, 2010) se realizan estudios del impacto del diseño arquitectónico en el estado de confort de viviendas, en concreto del ámbito rural. Aunque se comenta el uso de dispositivos para regular la ventilación no se contemplan las posibles variaciones en cuanto a la diferencia de implantar una instalación domótica. Aún situándose el

estudio en viviendas de zonas rurales esto no es óbice para el uso de la domótica.

La transferencia de energía hacia el interior y el efecto de las sombras exteriores se han estudiado por algunos autores como (Feng, Zhang, Sha, & Wang, 2014), pero no se prevé su regulación automática.

En cuanto a los estudios relativos a las técnicas de control como los presentados por (Dounis & Caraiscos, 2009), podrían ser un punto de apoyo para incorporar en el algoritmo domótico de persianas; aunque en principio no se tiene en cuenta el uso de sistemas de oclusión solar salvo cortinas para regular la iluminación. Si bien las cortinas pueden aprovecharse para regular la incidencia solar hacia el interior, no suelen estar automatizadas y aun estándolo no son tan eficaces como las persianas para reducir la incidencia energética del sol.

En estudios que ligan la sensación de confort y ahorro energético (Dounisa, P.Tiropanisb, A.Argiriouc, & A.Diamantis, 2010), se emplean algoritmos complejos basados en control Fuzzy; pero no contemplan el hecho de poder controlar la energía solar pasiva mediante la domótica de persianas, de modo que son susceptibles de ser mejorados.

La arquitectura bioclimática centra su aplicación en el diseño de edificios que aprovechan la energía solar pasiva del entorno en el que están ubicados. El diseño bioclimático de las viviendas pasa, entre otros aspectos, desde la orientación hasta la elección de los materiales de construcción. La elección correcta de estos aspectos revierte en un ahorro energético considerable. No obstante en (Tzikopoulos, Karatza, & Paravantis, 2005) se asume que la influencia de la energía solar pasiva no debe descartarse a la hora de modelar la eficiencia energética en edificios y debe ser considerada tanto para la obtención de la orientación de la vivienda como para la elección de los materiales de construcción empleados. Así mismo, se indica que debe realizarse un estudio profundo, puesto que es una variable con gran influencia en el ahorro energético.

Aun cuando se ha considerado en (Omer, 2006) una estrategia a seguir la regulación solar en verano mediante el uso de persianas para evitar el sobrecalentamiento, también se indica que se debe complementar con otras medidas pasivas pero no se valora cuantitativamente el ahorro energético que puede suponer.

Otros estudios como en (Buoro, Casisi, Pinamonti, & Reini, 2012) hacen una valoración del consumo energético global tanto en invierno como en verano debido a los sistemas de climatización y al apoyo de unidades de cogeneración para reducir el consumo pero sin considerar el uso de la energía solar pasiva como variable a tener en cuenta a la hora de hacer el balance energético, sólo se considera el control de persianas para la regulación de la iluminación pudiéndose mejorar el estudio.

Es común que se considere el aprovechamiento de la energía solar pasiva, (Orosa & C.Oliveira, 2008), pero no el incremento en la eficiencia energética debido a la automatización; habitualmente se estudia la incidencia del diseño de los edificios. En el caso de edificios dedicados a oficinas se puede encontrar la domótica y, por tanto, es muy probable que disponga de persianas automatizadas. Se estima que el control de las mismas incrementaría aún más la eficiencia energética del edificio.

Se ha estudiado en (Kapur, 2004) el impacto de las persianas como sistema de bloqueo de la luz solar y la re-radiación que sobre los cristales provocan pero no se ha cuantificado el impacto sobre la estancia a la cual protegen ni se ha hecho el estudio sobre una vivienda real.

El impacto mayor de la radiación solar está dado en los meses de estío. Sin embargo hay estudios, (Bessoudo, Tzempelikos, Athienitis, & Zmeureanu, 2010), que valoran la aplicación de las persianas tanto externas como internas para los meses de invierno. En el estudio presentado en este documento de Tesis Doctoral se considera exclusivamente el periodo en el que el sol aporta una energía innecesaria que es necesario compensar con el consumo del equipo de aire acondicionado.

Por último en (Yao, 2014) se empieza a ver el beneficio de regular la incidencia solar en las estancias pero no se contempla su automatización; sino que el usuario, manualmente, es quien realiza la función de posicionar las persianas. Esto no sólo obliga a que éste esté presente sino que, además, debe permanecer pendiente de las condiciones climatológicas cambiantes.

Un estudio más minucioso se presenta por (Yao, 2014); utiliza toldos, pero sólo en simulación prevé el ahorro energético al regular la posición de éstos en función de la incidencia de la radiación solar.

En estudios como en (Breitenbach, Lart, Längle, & Rosenfeld, 2001), (Athienitis & Tzempelikos, 2002), (Gugliermetti & Bisegna, 2006),

(Lehar & Glicksman, 2007), (Hviid, Nielsen, & Svendsen, 2008), (Chen, Li, & Chen, 2009), (Koo, Yeo, & Kim, 2010), (Park, Choi, Jeong, & Lee, 2011), (Wymelenberg, 2012) y (Zhang & Birru, 2012) se han centrado en el control de persianas venecianas para regular la intensidad luminosa del interior de las estancias pero no contemplan el impacto térmico que pueden controlar.

Otros como (Reinhart, 2004), (Tzempelikos & Athienitis, 2007), (Tzempelikos, 2008), (Simmler & Binder, 2008), (Hu & Olbina, 2011) y (Oldewurtel, y otros, 2012) centran la simulación en el control del flujo luminoso, sin tener tampoco en cuenta el aporte extra de energía del sol.

Las persianas venecianas son uno de los recursos más utilizados para la regulación de la incidencia solar hacia los edificios en diversos países. La mayoría de los estudios centran sus esfuerzos, como se ha comentado antes, en determinar el impacto en la luminosidad mientras que algunos como (Pfrommer, Lomas, & Kupke, 1996), (Park & Athienitis, 2003) y (Kuhn T. E., 2006) sí realizan estimaciones, mediante simulación, sobre la transferencia térmica en función de su uso.

En el estudio de (David, Donn, Garde, & Lenoir, 2011) se tienen en consideración diferentes sistemas para reducir la radiación solar pero no se valora el ahorro energético que se puede obtener con ellos.

Otros autores como (Guillemin & Molteni, 2002) se han decantado por el empleo de lógica Fuzzy y algoritmos genéticos para adaptar el grado de apertura de las persianas en un sistema automatizado; pero sólo para adaptarlo a los niveles de iluminación requeridos por el usuario. Al no tener en cuenta el sistema de climatización, este sistema es susceptible de ser mejorado.

La consideración, hecha por (Shen & Tzempelikos, 2012), del uso de persianas interiores prevé la mejora del ahorro energético gracias a la automatización; pero se mejora si no es sólo simulación.

Algoritmos de aprendizaje, como el presentado por (Shaikh P. H., Nor, Nallagownden, Elamvazuthi, & Ibrahim, 2014), y otros algoritmos de estrategias de predicción, como el de (Zamora-Martínez, Romeu, Botella-Rocamora, & Pardo, 2014), son susceptibles de ser mejorados incorporando como variable de entrada la incidencia de la radiación solar y como variable de control la regulación de las persianas para dar mucha mayor versatilidad y mejorar la eficiencia energética.

Así en (Oldewurtel, y otros, 2012) se propone recoger información de predicciones meteorológicas para controlar el sistema de climatización de forma más eficiente.

Estudios como los presentados por (Wymelenberg, 2012) y (O'Brien, Kapsis, & Athienitis, 2013) detallan las formas usuales de uso de las persianas en edificios de oficinas buscando los comportamientos diferentes entre la actuación manual, la actuación manual motorizada y la actuación automática. Son estudios cualitativos y no cuantifican los efectos físicos que se obtendrían con estas regulaciones. También se ha hecho un registro en (Rea, 1984), (Foster & Oreszczyn, 2001) y (Sutter, Dumortier, & Fontoynont, 2006) del comportamiento de los usuarios para valorar el uso que se hace de las persianas en entornos de trabajo como oficinas.

Además se ha estudiado el impacto de las persianas interiores (Kuhn, Bühler, & Platzer, 2001) y exteriores (Simmler & Binder, 2008), (Baldinelli, 2009), para evitar el sobrecalentamiento de la vivienda; pero no se ha cuantificado el ahorro energético que se puede conseguir en el sistema de climatización. En fachadas dobles, en el estudio de (Gratia & Herde, 2007) se ha tenido en cuenta la mejor posición para un sistema de oclusión solar pero tampoco se ha significado la mejora que pueda aportar si éste se automatizara.

Un estudio, presentado por (Tzempelikos & Athienitis, 2007), basado en simulación, prevé que el uso automatizado de persianas permitirá un ahorro energético considerable uniendo el ahorro de los equipos de iluminación con el de los sistemas de climatización. Como se trata de una simulación se puede mejorar con datos reales de la instalación.

3. Justificación

La idea de esta Tesis Doctoral surge como una nueva utilidad de los sistemas domóticos centrada en el ahorro energético. En base a la misma se ha implementado una aplicación práctica de un sistema domótico experimental que se ha implantado en una vivienda unifamiliar de Rincón de Soto, La Rioja (España). Se trata de un sistema domótico basado en un desarrollo personal y no en componentes comerciales, lo que permite la implantación libre/abierta de algoritmos de control específicos para aumentar las capacidades de gestión de la vivienda. Esto no supone una barrera para que el sistema se implante en instalaciones domóticas comerciales mediante la inclusión de un sistema de control adicional, en algunos casos, o mediante la programación dedicada en otros.

La observación diaria del comportamiento de los sistemas de climatización en verano sometidos a las condiciones de irradiación solar da pie al estudio de la optimización mediante la regulación de esta irradiación solar a través de las persianas motorizadas.

El proceso de regulación manual consiste, como es lógico, en aprovechar la energía solar irradiada subiendo las persianas en invierno, para calentar las estancias, y justamente lo contrario en verano; es decir, bajarlas para no sobrecalentar.

En una vivienda no domótica se requiere la atención del usuario en momentos del día para que su actuación sobre las persianas permita mantener una temperatura de confort en la vivienda. La automatización de las persianas libera al usuario de esta actuación continua además de propiciar el ahorro energético.

Uno de los equipos comúnmente presentes en una instalación domótica en nuestra área geográfica como es la automatización de las persianas puede permitir un incremento en la eficiencia energética de la vivienda en lo relativo a la climatización. El uso de persianas enrollables exteriores, tanto manuales como motorizadas, no es de uso regular en

algunos países, si bien, en la zona mediterránea está ampliamente implantado. La principal función que se le da a las persianas es la regulación del flujo luminoso hacia el interior de la vivienda (DOMOTYS. Internacionalización e Innovación de las empresas españolas de Domótica e Inmótica, s.f.). El aporte de energía hacia la vivienda por parte de lo que se denomina energía solar pasiva es considerado en (IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, s.f.) y (CEDOM. Asociación española de domótica e inmótica, s.f.) como algo positivo que, normalmente, es de aprovechar en los meses fríos y revierte en el incremento de la eficiencia energética.

La incidencia de la radiación solar en los meses de estío, sin embargo, provoca un aporte energético elevado y, si se considera el aporte hacia el interior de la vivienda a través de superficies acristaladas como las ventanas, éste proporciona un efecto invernadero no deseado. La regulación de la radiación solar incidente en el interior mediante las persianas evita un sobrecalentamiento que, para mantener el nivel de confort, debe ser asumido mediante el trabajo de los equipos de climatización (aire acondicionado).

Fuera del periodo de estío la influencia de la radiación solar es mucho menor que en el caso anterior y su apoyo al sistema de climatización (calefacción) no es tan significativo como el perjuicio que crea en los meses de verano.

A partir de un algoritmo de control en el sistema domótico con motorización de persianas y mediante una serie de sensores situados tanto dentro como en el exterior de la vivienda se demostrará un aumento en el ahorro energético, mediante la exclusión de la luz solar en verano para evitar el sobrecalentamiento (que obligaría al sistema de aire acondicionado a compensar la excesiva temperatura).

El estudio se centra en los meses de verano donde, como se ha comentado, la regulación de la radiación solar conlleva un incremento mayor del ahorro energético.

Hoy en día es prácticamente habitual que las viviendas domóticas dispongan de motorización en las persianas. Se tratará de comprobar las ventajas de la inclusión del algoritmo en la instalación sin incrementar prácticamente el costo de la misma, ya que se aprovechan los dispositivos instalados, consiguiendo un aumento del ahorro energético y creando un valor añadido a la instalación preexistente.

4. Objetivos

En este apartado se detallan los objetivos tanto generales como específicos que han dado lugar a esta Tesis Doctoral.

4.1. Objetivo general

Los objetivos de esta Tesis Doctoral son comprobar y cuantificar experimentalmente el ahorro energético que supone el uso de un algoritmo de control que gestiona la posición de las persianas externas enrollables de una vivienda domótica.

Además se modelizará el sistema de control mediante el uso de redes neuronales. Se entrenarán diferentes arquitecturas y se compararán para determinar cuál se ajusta más al modelo real.

4.2. Objetivos específicos

En esta Tesis Doctoral se propone una aplicación domótica que, sumada a las anteriores, aparte de conseguir el objetivo de una mejor regulación térmica de la vivienda, permite minimizar el gasto de la energía necesario para dicha regulación, consiguiendo a su vez un ahorro económico. La aplicación que se propone es la regulación de la incidencia solar en la vivienda mediante el control de las persianas exteriores enrollables motorizadas, de modo que las ventanas actúen como placas solares controladas.

A partir de una vivienda piloto, con una instalación domótica experimental, se registran datos climáticos, ambientales y energéticos, para analizar el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado en los meses de verano.

Se toman los valores de un año en el que no se implementa ningún sistema de regulación de la luz solar que penetra en la vivienda, ni siquiera de forma manual, y de otro año en el que sí se regula mediante un algoritmo de control.

Inicialmente se comparan los consumos de ambos años ya que al ser muy similares se puede considerar que se ha realizado el estudio en dos viviendas piloto idénticas, sometidas a las mismas condiciones, donde una ha tenido regulación y la otra no.

Posteriormente se procesan los datos registrados mediante redes neuronales para crear un modelo del sistema de regulación. Se diseñan redes neuronales de diferentes arquitecturas para buscar la que mejor se ajuste, según criterios establecidos, al modelo del sistema a estudio. El modelo obtenido mediante las redes neuronales convenientemente

entrenadas se aplica sobre los datos del año sin control para comprobar el ahorro energético que se hubiera obtenido de haberse aplicado el algoritmo en ese año.

5. Metodología

Se ha diseñado e implementado una planta piloto real en la que se cuenta con un sistema domótico abierto (un diseño propio que deja completamente abierta la programación y que permite tanto la integración de módulos comerciales como la de diseños propios).

Además se ha diseñado un algoritmo de control que permite automatizar el control de las persianas, de modo que actúen como "paneles solares controlados"

Sobre dicha planta se han tomado medidas durante dos años meteorológicamente comparables (en los periodos de estío). El primer año permite obtener la información del sistema previamente a la implementación de los algoritmos de control. El segundo año refleja el comportamiento del sistema funcionando en base a las consignas del sistema de control implementado.

Sobre el año "controlado" se han aplicado técnicas de inteligencia artificial, basadas en redes neuronales, que han permitido obtener diferentes modelos de comportamiento energético del sistema de refrigeración.

Se ha realizado un estudio del comportamiento de los diferentes modelos en base a los errores y sensibilidad de los mismos.

Con cada uno de los modelos se ha recalculado el consumo del sistema sobre el año "sin control", simulando el consumo energético que se hubiese obtenido en el caso de haber utilizado control.

Posteriormente se ha realizado una comparativa entre el comportamiento de los diferentes modelos y se han extraído conclusiones.

Para todo ello ha sido necesario incidir sobre el diseño de la edificación (para una integración eficiente del sistema domótico) e implementar el algoritmo de control.

5.1. Planta piloto para la validación del estudio

Previa a la construcción de la planta piloto se analizan las condiciones que ésta debe reunir para interactuar con una instalación domótica. Se ha evitado la utilización de elementos comerciales para permitir que el campo de desarrollo soporte un abanico de posibilidades "abierto", y no ceñido a las limitaciones numerosas técnicas de los fabricantes.

Se ha implementado un sistema descentralizado por la ventaja, fundamental, de no depender de un único elemento controlador y poder distribuir la inteligencia y el control en diferentes zonas de la planta de forma sincronizada.

La planta piloto implementada es una vivienda unifamiliar de dos alturas situada en la Avenida de Cameros, 14 BIS de Rincón de Soto (La Rioja, ESPAÑA) [42° 13' 58.4508" Norte, 1° 50' 47.8134" Oeste] en la que se implanta el sistema domótico propio.

La fachada principal está en orientación Este – Noreste (ENE) y no posee edificios frente a ella lo que evita la formación de sombras sobre ella. Según el Código Técnico de la Edificación (CTE. Código Técnico de la Edificación, s.f.) la orientación a considerar sería Este (Tabla 3).

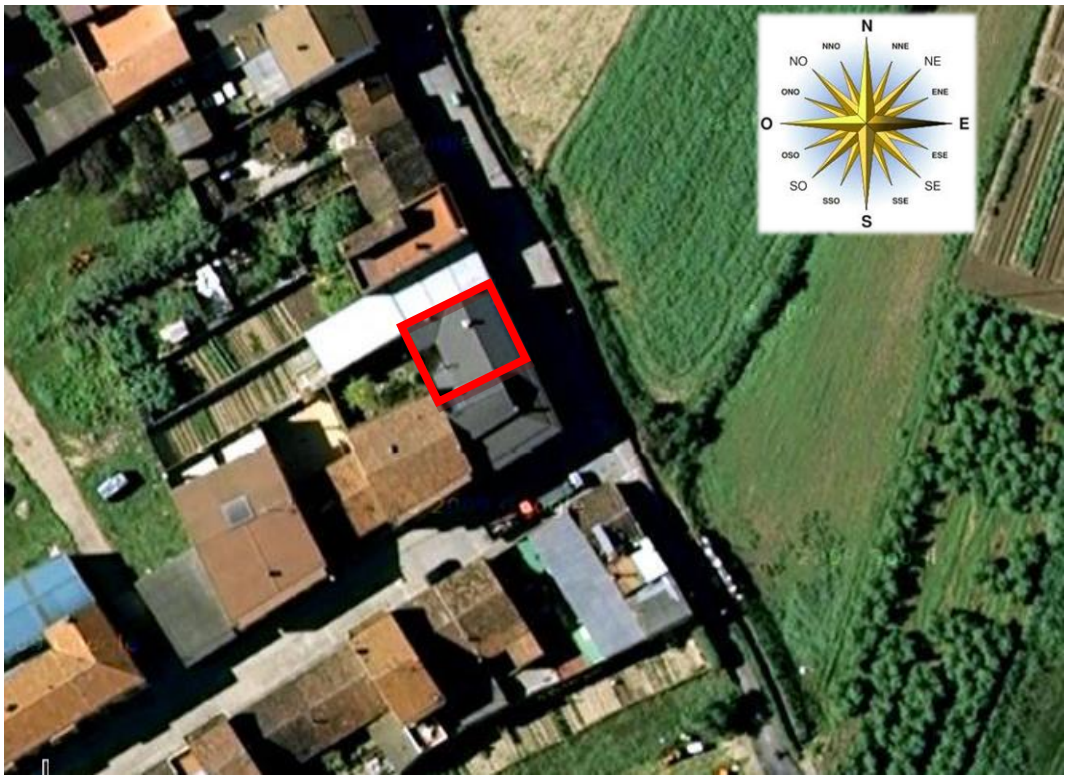
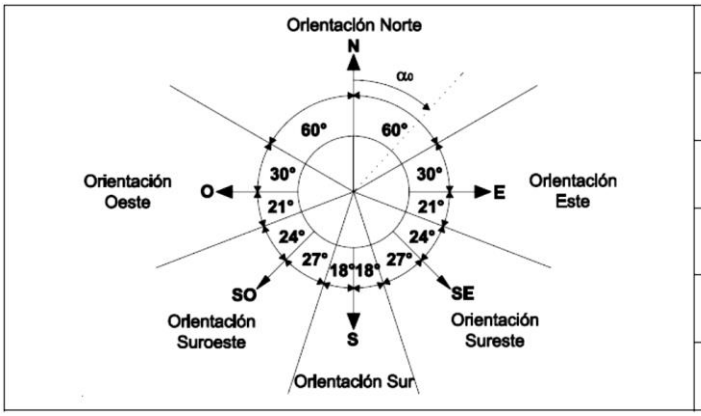


Ilustración 4. Vista satélite de la situación y orientación de la vivienda.



Norte	$\alpha < 60;\ \alpha_0 \geq 300;$
Este	$60 \leq \alpha_0 < 111$
Sureste	$111 \leq \alpha_0 < 162$
Sur	$162 \leq \alpha_0 < 198$
Suroeste	$198 \leq \alpha_0 < 249$
Oeste	$249 \leq \alpha_0 < 300$

Tabla 3. Orientaciones de las fachadas.

Ilustración 5. Vista de la fachada principal.

La vivienda consta de bajo y primer piso, que es el que contiene las estancias se desarrolla la vida normal de la vivienda, y servirá de objeto de estudio.

En la fachada principal se encuentran tres estancias:

- Salón
- Dormitorio 1
- Cocina

La fachada opuesta a la principal tiene salida a un patio interior y las cinco estancias que dan a él son:

- Dormitorio 4
- Baño 1
- Dormitorio 3
- Dormitorio 2
- Baño 2

Estas cinco últimas estancias están sometidas a sombras de las paredes del patio interior.

El estudio que se realiza se centra en la fachada principal ya que es la que más está influenciada por la radiación solar y también es la que tiene mayor superficie acristalada.

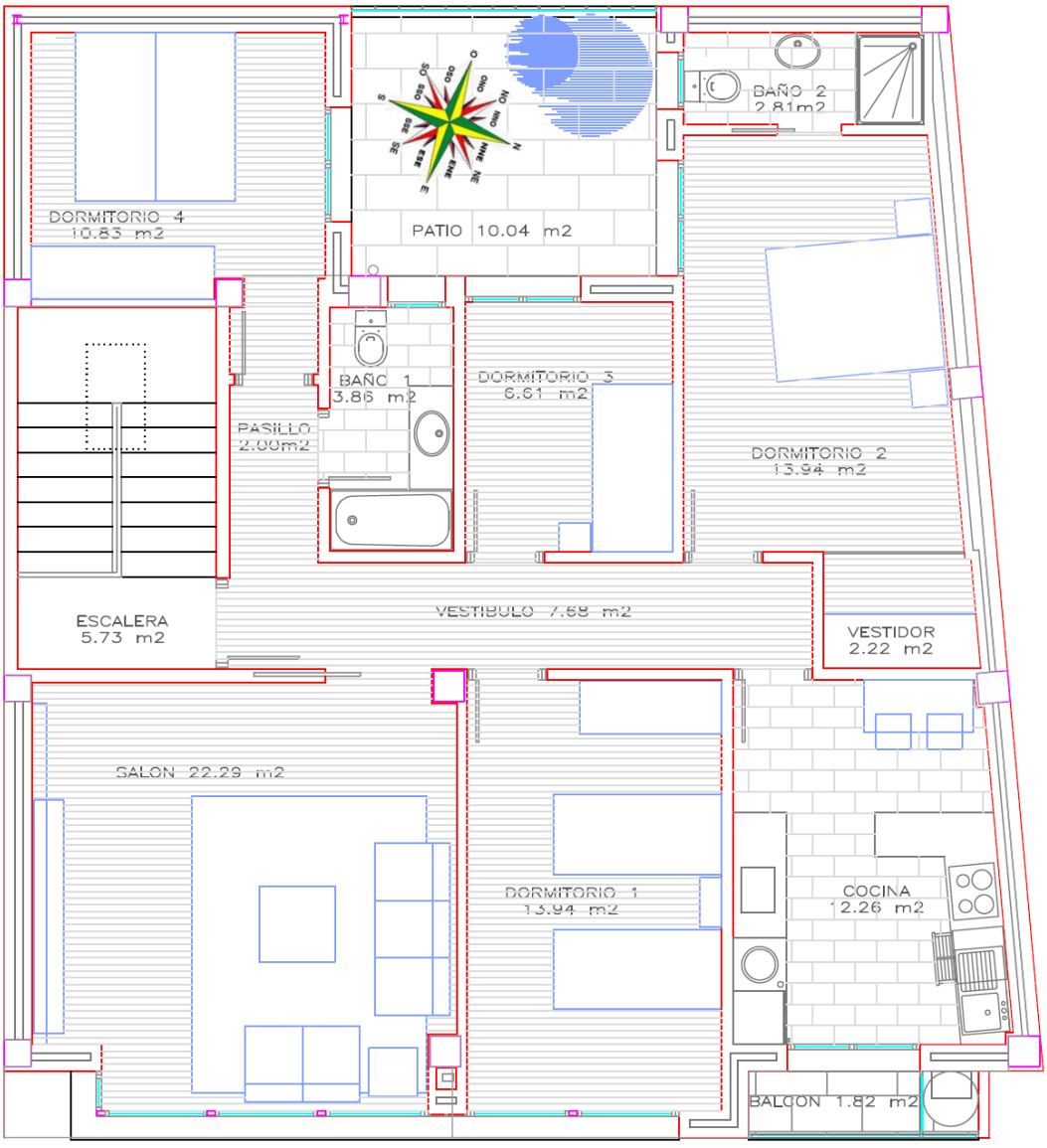


Ilustración 6. Plano planta primera: Distribución de estancias.

La fachada principal está formada por un muro de doble hoja: pared de fábrica resistente estructural (ladrillo perforado) con aplacado de piedra natural, cámara de aire, aislamiento térmico y tabique interior de doble cámara.

Las ventanas son de carpintería de PVC con acristalamiento doble con cámara de aire en configuración 6 – 12 – 5.

Ilustración 7. Detalle ventana PVC con doble acristalamiento.

5.2. Instalación domótica

La instalación domótica está constituida por un sistema distribuido de tarjetas que realizan independientemente las tareas de registrar las entradas y controlar las salidas además de comunicarse entre ellas. Las entradas están realizadas con pulsadores y sensores de presencia y las salidas mediante tarjetas con distintos sistemas de activación.

En la Ilustración 8 y en la Ilustración 9 se puede ver una distribución de los diferentes dispositivos de entrada y salida para la planta baja y la planta primera respectivamente.

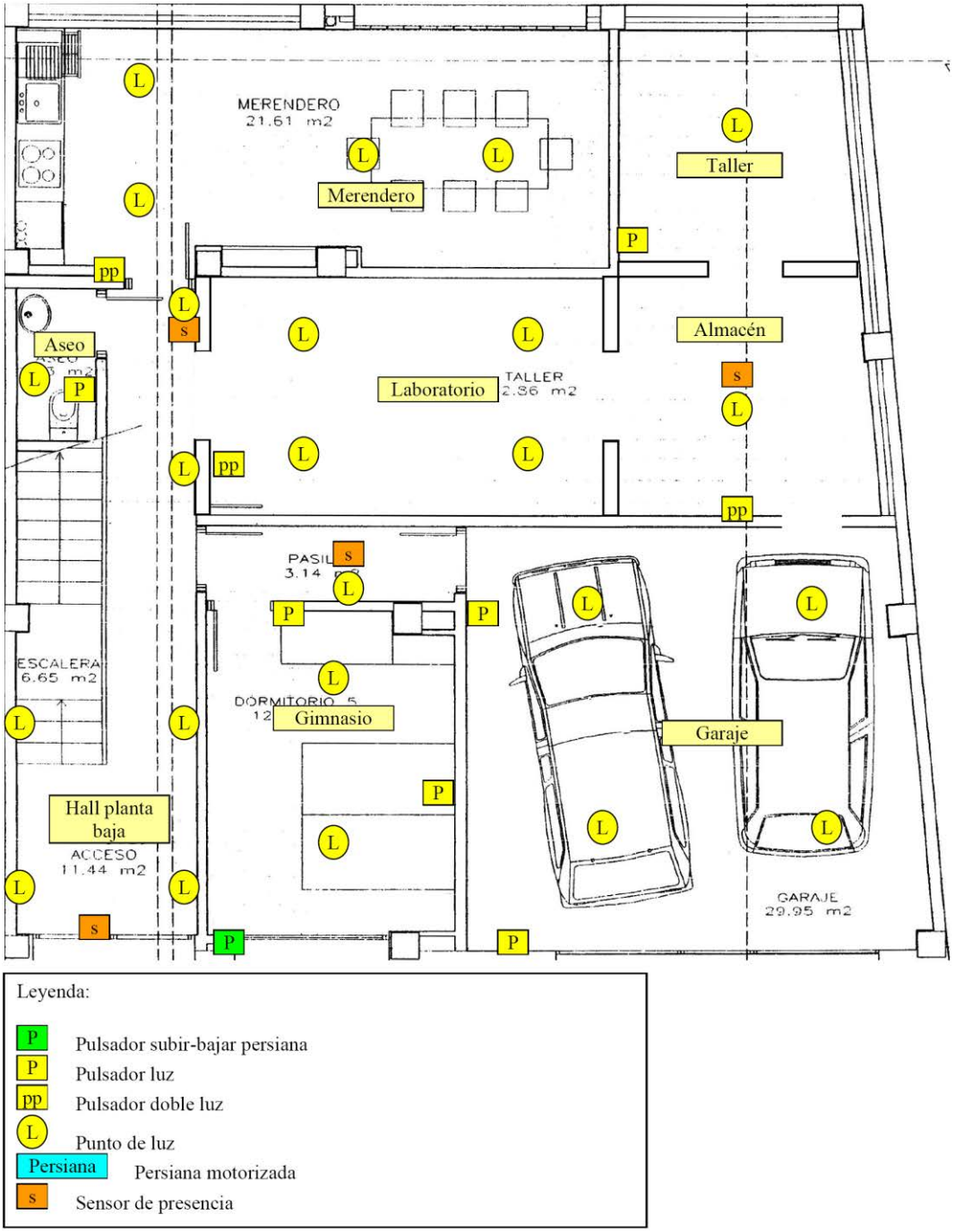


Ilustración 8. Elementos domóticos en planta baja.

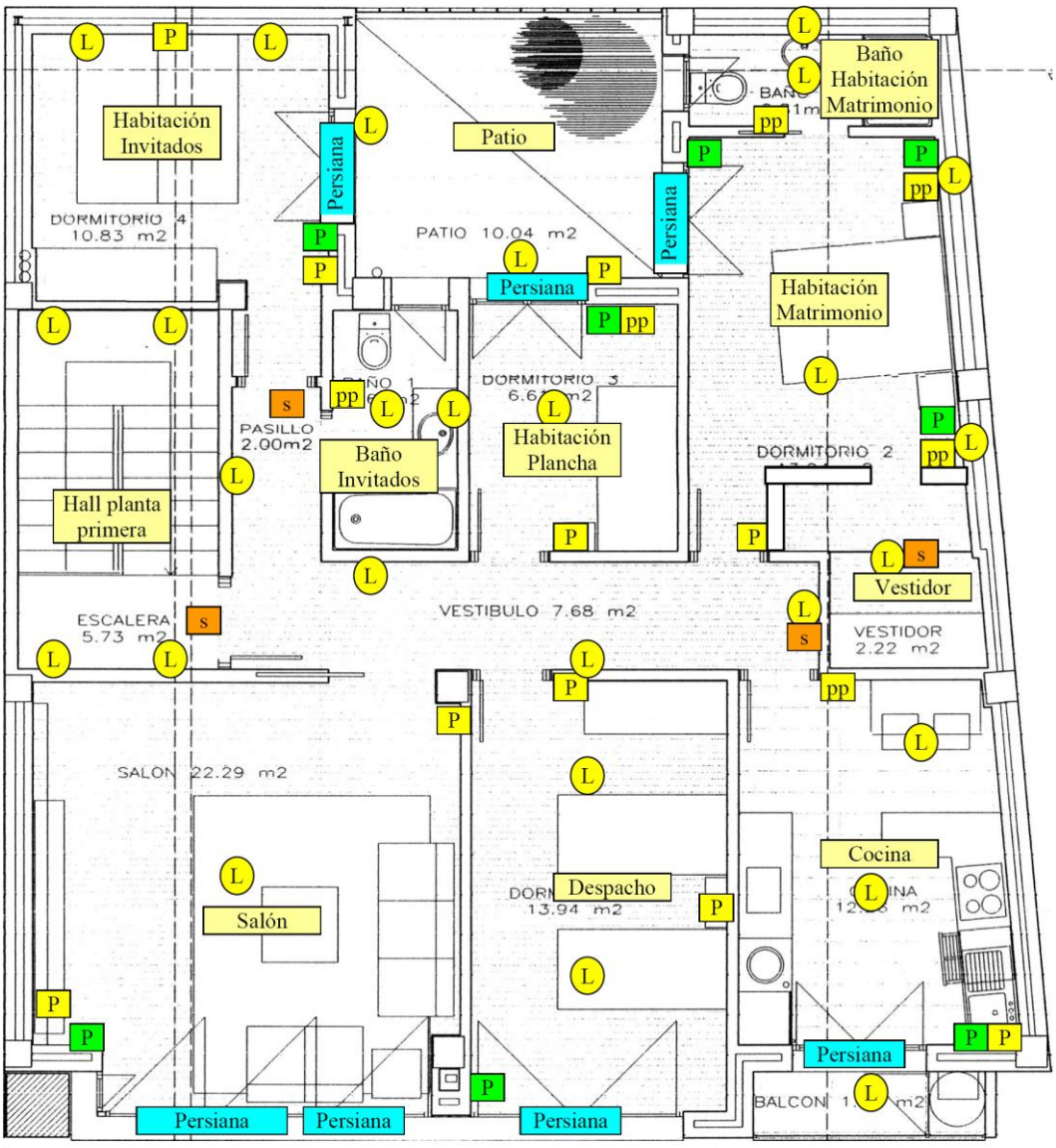


Ilustración 9. Elementos domóticos en planta primera.

5.2.1. Tarjetas domóticas

La instalación domótica consta de 12 tarjetas domóticas de control que denominamos como tarjetas base interconectadas en un bus RS485 repartidas en 5 para la planta baja y 7 para la planta primera. Los extremos del bus se encuentran en la tarjeta situada en la caja número 1 (planta primera) y en la situada en la caja número 38 (planta baja). Ambas plantas están interconectadas con la conexión entre las tarjetas de las cajas 5 (planta primera) y 37 (planta baja).

5.2.1.1. Tarjetas base

Las tarjetas base contienen el elemento de control para gestionar 8 entradas digitales, 8 salidas digitales y 4 entradas analógicas además de la conexión al bus RS485.

5.2.1.2. Tarjetas de actuadores

Los sistemas de actuadores van unidos a las salidas digitales de las tarjetas base y son de 2 tipos:

- Actuadores con salida a triac.
- Actuadores con salida a relé.

5.2.2. Sensores de presencia

Para la activación automática de luces en las zonas de paso se han utilizado sensores de presencia por infrarrojos de distintas características según la adaptación necesaria a la zona en concreto.

5.2.3. Gestión de la climatización

5.2.3.1. Fancoils

La climatización de la instalación se gestiona mediante fancoils ROCA (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.2.3, página 228) repartidos por las diferentes estancias que permiten realizar las funciones de calentamiento y enfriamiento. Los fancoils son dispositivos de climatización que constan de una batería o intercambiador, válido para frío y calor, más un ventilador tangencial.

Este ventilador puede funcionar a 3 velocidades diferentes para regular el flujo de aire desde el intercambiador al ambiente.

Ilustración 10. Fancoil. Vista exterior.

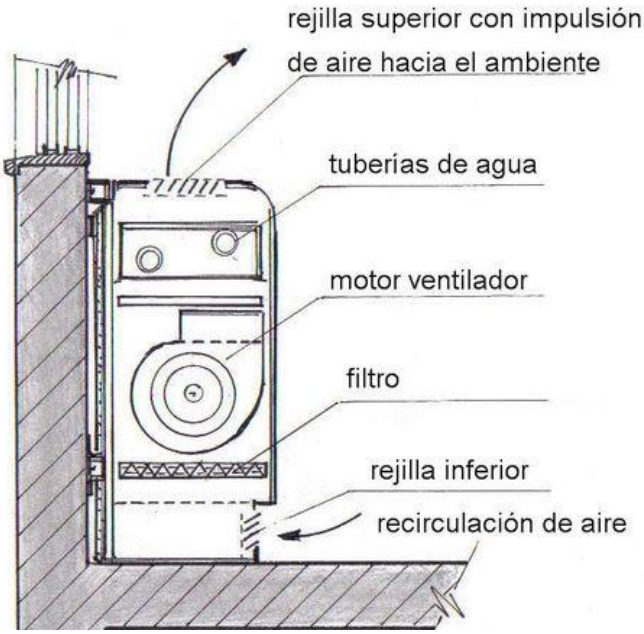


Ilustración 11. Fancoil. Configuración interna.

Mediante un flujo de agua fría o caliente se consigue que el dispositivo realice las funciones de aire acondicionado o calefacción respectivamente. A estos fancoils se les ha hecho una modificación para añadir una resistencia calefactora eléctrica superpuesta al intercambiador de fluido para individualizar más el sistema de calefacción.

El flujo de agua para los fancoils está controlado térmicamente por una caldera de gas natural y una enfriadora.

La planta primera dispone de 6 fancoils que disponen de un único flujo de agua a través de ellos. En el caso de la planta baja hay un total de 3 fancoils pero cado uno de ellos dispone de una válvula, controlada eléctricamente, que controla (permite o no) el paso del agua del circuito a través de su intercambiador. De esta manera se puede desactivar la climatización en las estancias de la planta baja ya que no son de uso cotidiano.

5.2.3.2. Calefacción

Las unidades fancoils pueden funcionar como elemento de calefacción de 2 maneras diferentes:

- Al recibir un flujo de agua caliente procedente de la caldera de gas.
- Mediante la resistencia calefactora eléctrica.

Ilustración 12. Caldera de gas natural.

Cuando toda la instalación requiere un aporte de calor, la caldera de gas ROCA (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.2.1, página 220) entra en funcionamiento y todos los fancoils reciben el flujo de agua caliente; mediante la regulación de la velocidad de los ventiladores de los fancoils se controla el flujo de aire caliente a la estancia.

Si alguna estancia necesita un aporte de calor y no es necesario en el resto de la instalación el sistema utiliza la resistencia calefactora integrada en el fancoil para realizar el calentamiento de dicha estancia y así evitar poner en marcha la caldera que haría circular el agua caliente por todos los fancoils.

La caldera de gas es activada mediante una salida a relé que pone en marcha su quemador y bomba de circulación de agua. Durante la activación del contacto el dispositivo mantiene el flujo constante de agua por el circuito a la temperatura seleccionada.

5.2.3.3. Aire acondicionado

Para la climatización en verano se dispone de una enfriadora CARRIER (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.2.2, página 223) que permite distribuir el flujo de agua fría a través de los fancoils. El control de la enfriadora, como el de la caldera de gas, es mediante una salida a relé. Al activar el contacto mediante el relé se activa la enfriadora de manera que gracias a su compresor y la bomba de circulación de agua mantiene el flujo constante de agua fría en el circuito de fancoils.

Ilustración 13. Enfriadora para aire acondicionado.

5.2.4. Interface con el sistema domótico

Como interface de monitorización y control de la instalación domótica no se ha realizado ningún hardware específico. Los interfaces diseñados son de tipo software para las siguientes plataformas:

- PC con sistema operativo Windows.
- Dispositivo portátil, Smartphone o Tablet con sistema operativo Android.

No obstante, sí se han desarrollado las correspondientes pasarelas para que los dispositivos nombrados puedan comunicarse con la instalación.

5.3. Algoritmo de control

Se diseña un algoritmo de control que, conjugando los valores de temperatura interior, temperatura exterior, radiación solar global e iluminación de la estancia, actúe sobre el grado de apertura de la persiana.

La funcionalidad principal del algoritmo de control es la reducción de la incidencia de la radiación solar directa hacia el interior de la estancia. Por la orientación de la vivienda, la radiación solar es máxima en las primeras horas del día, prácticamente desde el amanecer hasta el mediodía aproximadamente.

La eliminación de la radiación solar directa permite reducir sensiblemente la temperatura interior. El algoritmo de control está centrado en la regulación en los días de verano, que son los de objeto de estudio de esta Tesis Doctoral.

Cuando el sistema detecta que la radiación solar directa está por encima de un umbral se activa el cierre de las persianas de la fachada correspondiente para evitar el efecto invernadero que se produciría en el interior. Al disminuir el nivel de radiación solar directa por debajo de un umbral preestablecido el sistema levanta las persianas para permitir la entrada de luz natural hacia el interior. El impacto de la radiación solar indirecta es mucho menor que el de la directa y por eso el sistema sólo intercepta la radiación solar mediante las persianas en los momentos en los que ésta pueda penetrar hacia el interior.

En la Ilustración 14 se muestra el diagrama de flujo simplificado del algoritmo de control que gestiona el control de las persianas en función de la radiación solar incidente.

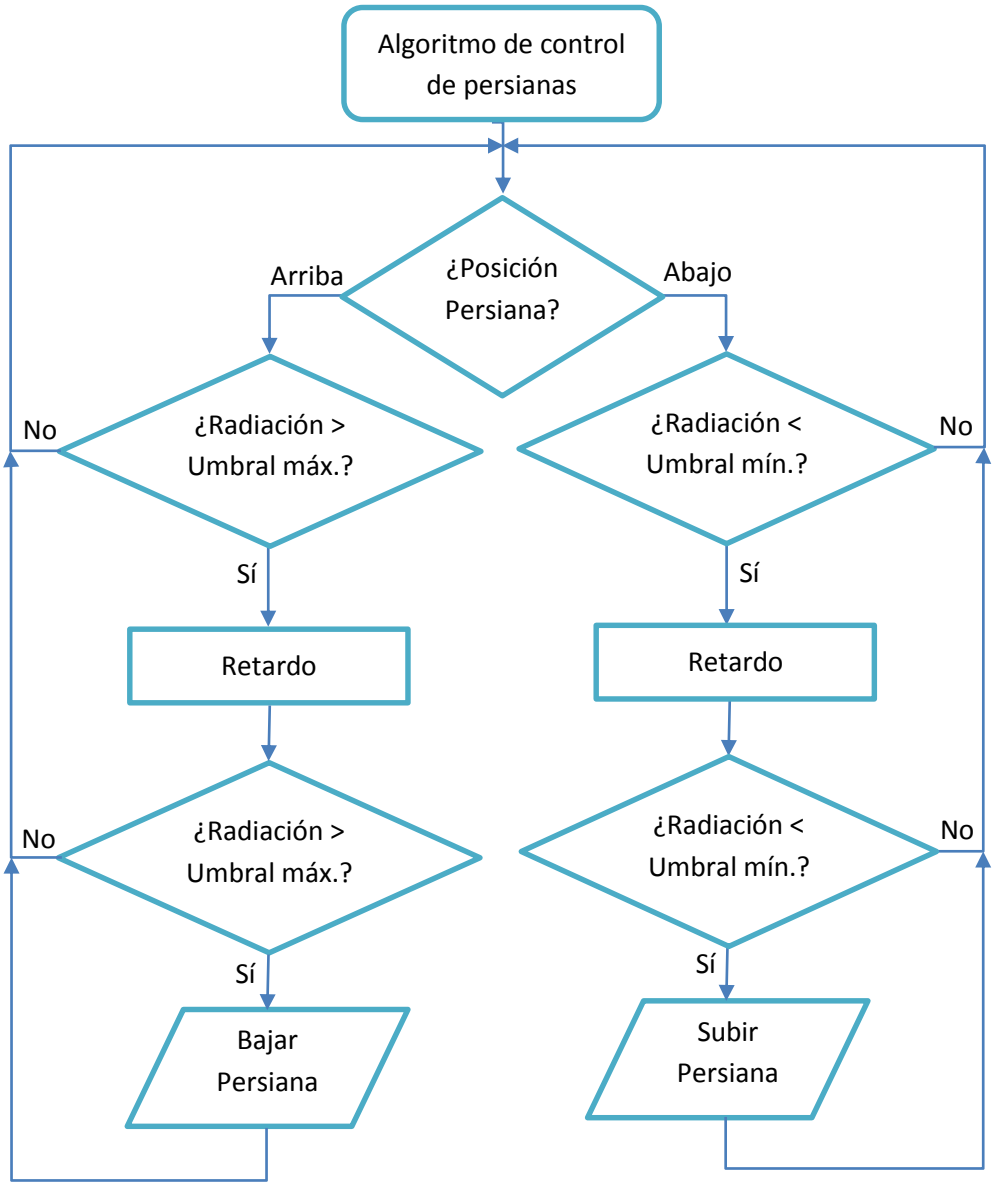


Ilustración 14. Diagrama de flujo del algoritmo de control de persianas.

5.4. Recogida de datos

El objeto de estudio de esta Tesis Doctoral se ha centrado en una de las estancias de la vivienda, concretamente la estancia denominada inicialmente como Dormitorio 1 y cuya aplicación actual es como despacho de trabajo. Esta estancia de 14 m^2 tiene una superficie acristalada en la fachada principal de 2 m^2 formada por dos ventanas de PVC oscilo-batientes con doble cristal con cámara de aire 6 – 12 – 5.

Ilustración 15. Situación en el plano de la primera planta de la estancia a estudio.

Ilustración 16. Posición en la fachada de las ventanas de la estancia a estudio.

Para el estudio objeto de esta Tesis Doctoral se ha desarrollado un sistema de sensores conectados a un PC para registrar periódicamente varias magnitudes físicas:

- Temperatura: Un sensor en la estancia a controlar más dos sensores exteriores, uno para la fachada principal y otro en la fachada del patio.
- Humedad relativa: Se considera interesante incluir la medición de la humedad relativa ambiente tanto en el exterior como en el interior por cada estancia ya que este parámetro influye en la sensación de confort ligado a la temperatura.
- Radiación solar: Como realmente el control de persianas sólo actúa sobre las fachadas principal y fachada del patio es suficiente un piranómetro en la fachada principal y otro en la fachada del patio en dirección opuesta al anterior. Como ya se ha comentado, el control se va a centrar en las estancias de la fachada principal así que consideraremos sólo el sensor de esta fachada.
- Nivel de iluminación: Para el interior de las estancias ya que si se solicita iluminación y está disponible en el exterior el sistema de control puede abrir parcial o totalmente la persiana para evitar el consumo eléctrico de la iluminación.

El listado de sensores y sus unidades son los siguientes:

Sensor	Unidades
Temperatura exterior	ºC
Temperatura interior	ºC
Humedad exterior relativa	%
Humedad interior relativa	%
Radiación global acumulada	W/m^2
Nivel de iluminación	lx
Energía eléctrica consumida	kWh

Tabla 4. Sensores utilizados para la recogida de datos y sus unidades.

Mediante un software creado en Visual Basic .NET se ha ido almacenando la información de los sensores conectados a un PC en intervalos de 1 hora.

Aunque los valores ambientales han sido recogidos a intervalos de 1 minuto, al completar una hora se ha almacenado la media de los mismos. El consumo de energía eléctrica recogido de forma horaria corresponde al total consumido durante la hora.

Para el estudio se ha registrado la información durante 2 años completos (2012 y 2013) lo que hace un total de $2 \cdot 365 \cdot 24 = 17.520$ muestras por sensor.

La diferencia de radiación solar global acumulada entre ambos años fue del 4.2%, y de la temperatura media durante el periodo de estío fue del 3.4%. Por lo que se estima que, a nivel de modelado de sistemas, los dos periodos son comparables.

Durante el año 2012 no se utilizó control de persianas y durante el año 2013 sí se utilizó el algoritmo de control.

Los datos válidos para el análisis han sido los del intervalo de días que fue necesaria la intervención del sistema de aire acondicionado. Así pues el intervalo de datos para el análisis ha sido:

- Año 2012 (sistema sin control): Del 11 de junio al 11 de septiembre, total 2232 lecturas por sensor.
- Año 2013 (sistema con control): Del 11 de junio al 6 de septiembre, total 2112 lecturas por sensor.

6. Modelado mediante redes neuronales

El uso de redes neuronales artificiales permite crear modelos de sistemas no lineales que otro tipo de funciones no podrían aproximar tan fielmente gracias al aprendizaje genético (Lippmann, 1987).

Las redes neuronales, (González & Hernando, 1995), están constituidas por un conjunto de neuronas artificiales que están interconectadas entre ellas y distribuidas en capas. Las neuronas de cada capa están conectadas con las neuronas de las capas adyacentes de manera que la información fluye entre ellas.

La arquitectura más usada consta de:

- Capa de entrada: Es la encargada de recibir la información del exterior. En nuestro caso recibe la información de los sensores del sistema a estudio.
- Capas intermedias u ocultas: Son las que realizan el trabajo de la red.
- Capa de salida: Es la capa donde se obtienen los resultados del aprendizaje de la red.

Cada una de las neuronas constituyentes de la red neuronal procesa la información que le llega a través de las conexiones procedentes de la capa anterior y envía el resultado por las conexiones que posee con la capa posterior a la suya, siempre y cuando dicho resultado cumpla la condición de superar un valor umbral.

Cuando la red está entrenada cada conexión entre neuronas tiene asignado valor que se denomina peso sináptico. La función matemática que se opera en cada neurona tiene en cuenta el peso de las conexiones con las neuronas de la capa anterior por donde le llega la información dando mayor importancia a las de mayor peso que a las de menor.

Una vez realizado el cálculo dentro de la neurona si el resultado supera el umbral marcado la neurona se activa y transmite una señal hacia las neuronas de la capa siguiente. En caso contrario, si el resultado no supera el umbral, la neurona no se activa y no se transmite ninguna señal.

Así pues, asignando unos valores iniciales de pesos a las conexiones, al recibir en las entradas un dato las neuronas comienzan el proceso anteriormente descrito propagándose hacia las salidas la información que, finalmente, generará un resultado en la salida. El resultado obtenido puede corresponderse o no al deseado en función de la entrada aportada.

Al entrenar la red se aplica a la misma un algoritmo de aprendizaje que hace variar los pesos sinápticos y los valores umbrales en las neuronas con objeto de que los resultados a la salida de la red sean lo más próximos a los deseados.

El método de entrenamiento de la red se simplifica expresando el valor umbral de cada neurona como un peso sináptico más pero como si se tratara de una neurona siempre activada, lo que se denomina "bias" y que está situada en la capa anterior. De esta forma el algoritmo de aprendizaje realiza el ajuste del umbral como si se tratara de un peso sináptico cualquiera.

Con el total de datos recopilados para el análisis una parte se utilizan para el entrenamiento de la red y una parte menor se reserva para, una vez finalizado el entrenamiento de la red, comprobar el buen ajuste de la misma. A este último conjunto de datos se le denomina datos de validación cruzada.

Los métodos de entrenamiento de la red neuronal pueden ser:

- Aprendizaje supervisado: Los resultados obtenidos tras el entrenamiento con un conjunto de datos de entrada se compara con sus correspondientes originales y se realizan los ajustes en la red para minimizar el error.

- Aprendizaje de refuerzo: A partir de los datos de entrada sólo se informa a la red si los resultados que obtiene a la salida son correctos o no.

- Aprendizaje no supervisado: La red busca patrones en los datos de entrada y crea categorías para, posteriormente, asignar los datos que le lleguen a dichas categorías.

6.1. Análisis de datos mediante redes neuronales

Para este estudio se utiliza el aprendizaje supervisado con un 80% de los datos recopilados. El 20% restante son empleados para validación cruzada y confirmar el buen ajuste de la red evitando el sobreentrenamiento de la misma.

Para optimizar el ajuste de la red neuronal al sistema a prueba se han desarrollado y entrenado diferentes redes neuronales.

Se registran los datos relevantes tanto en el interior como en el exterior de la vivienda durante un año en el que no se aplica el algoritmo de control y durante otro año en el que se aplica el algoritmo.

Con los datos registrados el siguiente paso es calcular el ahorro energético estimado durante el periodo a estudio, concretamente durante los meses de verano, en base a la diferencia entre el consumo energético del equipo de aire acondicionado al no utilizar ningún control y el consumido utilizando el control propuesto.

Dado que la respuesta del sistema es altamente compleja de modelar, para poder tener un modelo del sistema que se aproxime al comportamiento real los datos registrados han sido evaluados mediante el uso de algoritmos genéticos utilizando redes neuronales y el software Neurosolutions (Neural Network Software, s.f.).

Se probarán distintas topologías de redes para buscar la mejor para el sistema. El criterio para seleccionar la mejor será buscar el menor error argumentado de la siguiente manera:

- El error estará calculado a partir del error cuadrático medio obtenido al aplicar la red neuronal al grupo de entrenamiento y del error cuadrático medio obtenido al aplicar la red neuronal al grupo de validación cruzada.

- El volumen de datos utilizado en el grupo de entrenamiento es tres veces superior al utilizado en el grupo de validación cruzada por tanto se va a dar distinta ponderación a cada uno de los errores, concretamente el error se calculará ponderando

un 25% del error cuadrático medio obtenido en el grupo de entrenamiento y un 75% del error cuadrático medio obtenido en el grupo de validación cruzada. Se da más importancia al error del grupo de validación cruzada ya que estos valores no se utilizan para ajustar la red, simplemente se utilizan para detener el entrenamiento cuando el error al ser utilizados empeora el resultado de ajuste; así pues, el comportamiento con el grupo de datos de validación cruzada nos da una idea de la capacidad de generalización de la red.

- Con el cálculo del error según lo anteriormente descrito nos quedaremos con la red que obtenga el valor más pequeño con lo que se da a entender que es una red que no es propensa al sobreentrenamiento y que, por tanto, generaliza mejor.

$$error_{red\ neuronal} = 0.25 \cdot MSE_{entrenamiento} + 0.75 \cdot MSE_{validación\ cruzada}$$

Ecuación 1. Cálculo del error de la red entrenada para comparar entre diferentes redes.

6.2. Entrenamiento de red MLP

La primera topología que se va a probar es la MLP (Multilayer Perceptron) o Perceptrón Multicapa.

El MLP, (Tabares, Branch, & Valencia, 2006), es una red hacia adelante (feedforward) que se compone de una capa de entrada donde los sensores aportan la información, una capa de salida y una o varias capas interiores ocultas que no tienen conexión directa con el exterior. Las neuronas de cada capa solamente están unidas con las neuronas de la capa inmediatamente anterior y con las de la capa inmediatamente posterior, excepto las de la entrada y salida que sólo conectan con una única capa. El número de capas ocultas se determinará en función de la complejidad de la función a implementar.

Su principal ventaja es que son fáciles de usar, y que se puede aproximar cualquier mapa de entrada/salida. Las principales desventajas son que su entrenamiento es lento y que requieren una gran

cantidad de datos de entrenamiento (por lo general tres veces más muestras de entrenamiento que los pesos de la red).

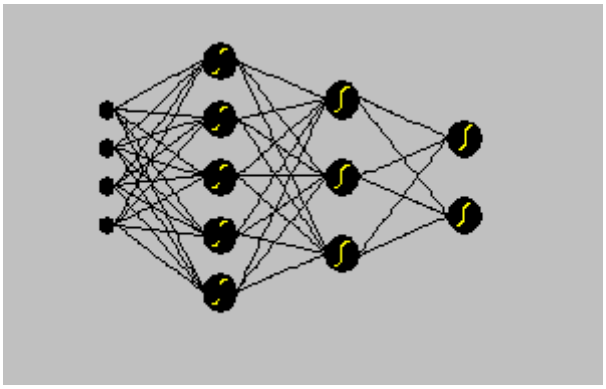


Ilustración 17. Arquitectura de una red MLP.

El entrenamiento de la red es un proceso de optimización genética en el cual se ha dejado que el programa escoja tanto el número de neuronas en las capas ocultas como los parámetros de factor de aprendizaje y de factor de momento del algoritmo de retropropagación de error.

6.2.1. Configuración de la red MLP

Los parámetros de configuración de la red neuronal introducidos en el software Neurosolutions para comparar los resultados y comprobar el incremento en el ahorro energético han sido los siguientes:

- Tipo de red: *Multilayer Perceptron*
- Configuración general de la red:
  - *Input PEs: 5*
  - *Output PEs: 1*
  - *Exemplars: 1698*
  - *Hidden Layers: 2*
- Configuración de la capa oculta 1:
  - *Processing Elements: 28*

    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa oculta 2:
    - *Processing Elements: 14*
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa de salida:
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Control de aprendizaje supervisado:
    - *Maximum Epochs: 3000*
    - *Termination: MSE, Cross Val. Set, Increase*
    - *Weight Update: Batch*

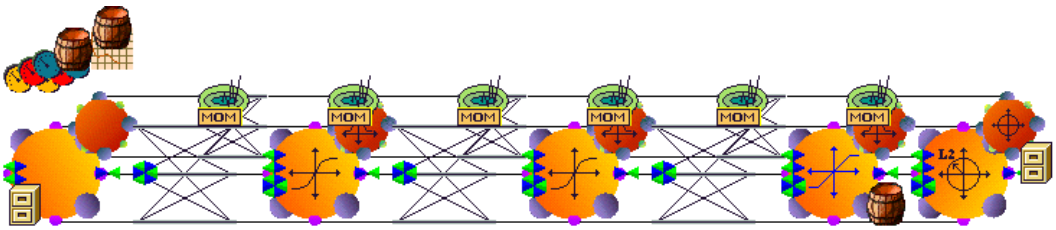


Ilustración 18. Red neuronal con topología MLP.

Los datos para el entrenamiento de la red se tomaron de los del intervalo indicado anteriormente del año 2013, año con control, y se organizaron de la siguiente manera:

- Datos de entrada:
  - Temperatura interior
  - Temperatura exterior
  - Humedad relativa interior
  - Humedad relativa exterior
  - Radiación global acumulada
- Datos deseados (salida):
  - Energía eléctrica consumida

En cuanto al volumen de datos por hora se distribuyen un 80% para el entrenamiento de la red y el 20% restante para validación cruzada tras reordenarlos aleatoriamente.

6.2.2. Informes del entrenamiento de la red MLP

El entrenamiento según algoritmos genéticos, basado en 50 generaciones de 50 individuos con optimización genética dio los siguientes resultados:

Como se ve en la Ilustración 19, el error en el mejor de los individuos ha ido disminuyendo conforme han evolucionado las generaciones de individuos hasta que a partir de la generación 17 no hay mejora.

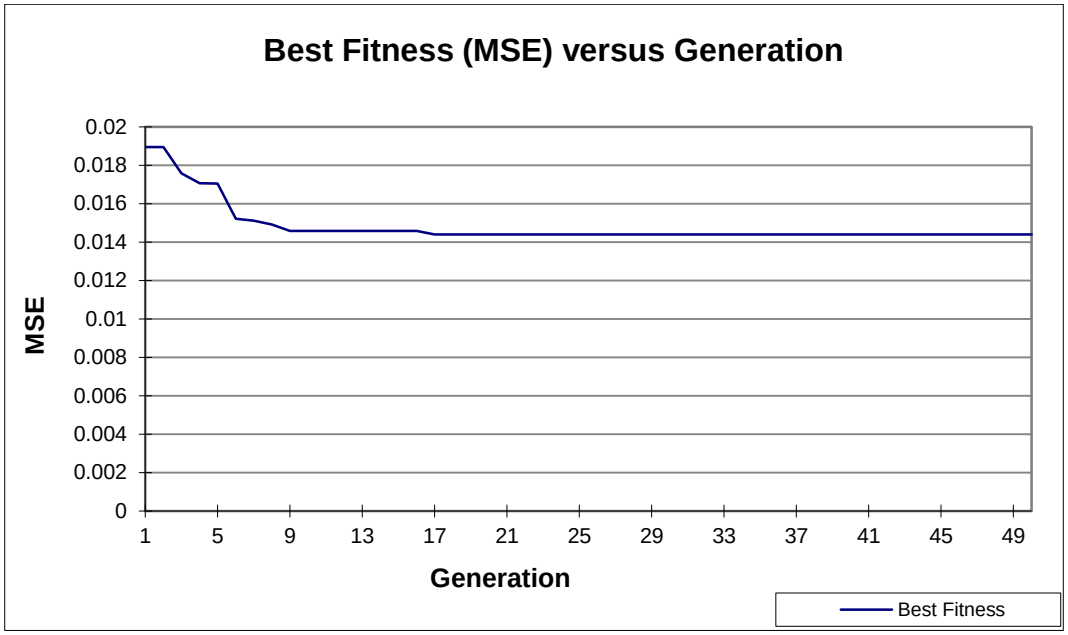


Ilustración 19. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red MLP.

En la Ilustración 20 se muestra la media de los 50 individuos de la generación donde se aprecia que la primera generación era muy mala pero con operadores de cruce se van concentrando los mejores bajando progresivamente la media.

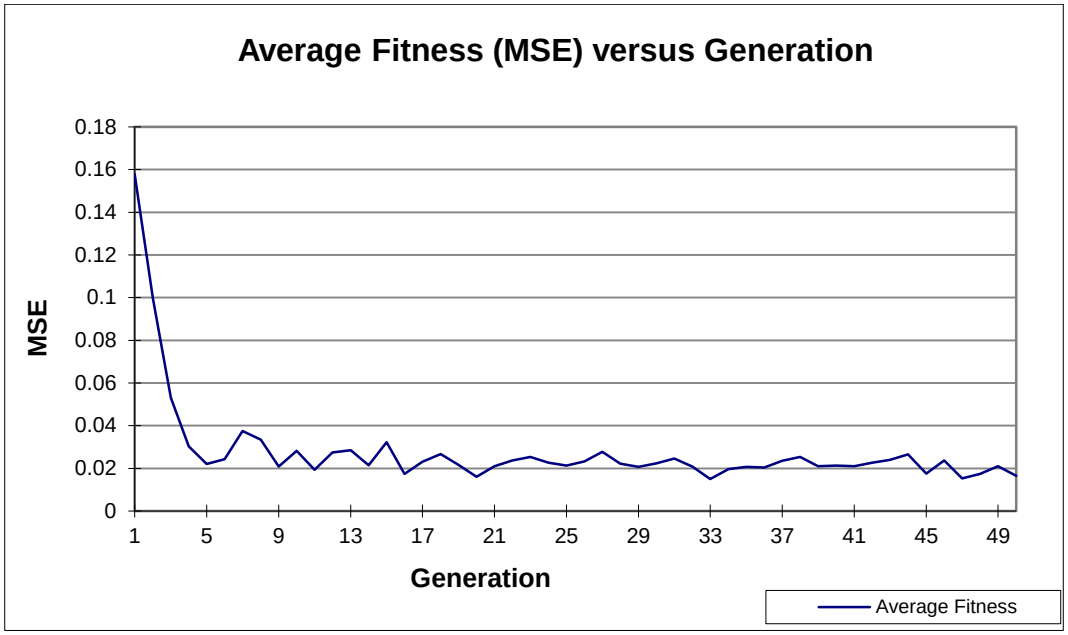


Ilustración 20. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red MLP.

En la Tabla 5 se resumen los resultados anteriores:

Optimization Summary	*Best Fitness*	*Average Fitness*
Generation #	17	33
Minimum MSE	0.014405851	0.015012259
Final MSE	0.014405851	0.016505869

Tabla 5. Resumen de la optimización genética en la red MLP.

Variable	Significado
Minimum MSE	Minimum Mean squared error (Mínimo error cuadrático medio)
Final MSE	Final Mean squared error (Valor final del error cuadrático medio)

Tabla 6. Variables del informe y su significado.

En la Ilustración 21 se puede ver la comparativa de los datos originales con los que la red neuronal MLP obtiene tras el ajuste de la misma con los datos de entrenamiento.

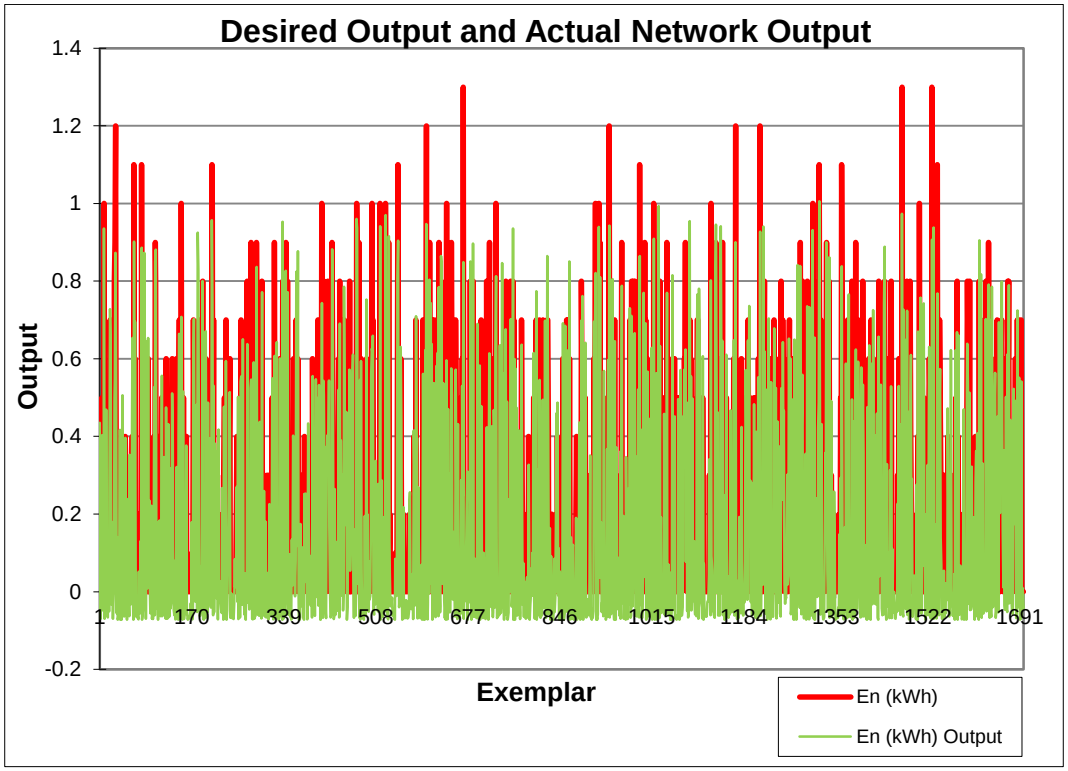


Ilustración 21. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal MLP.

La Tabla 7 muestra los valores de errores de la red MLP entrenada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.01246229
NMSE	0.157631803
MAE	0.083033546
Min Abs Error	0.000146975
Max Abs Error	0.59763577
r	0.925775377

Tabla 7. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MLP al grupo de entrenamiento.

Variable	Significado
MSE	Mean squared error (Error cuadrático medio)
NMSE	Normalized Mean squared error (MSE/variance of desired output) (Error cuadrático medio normalizado con la varianza)
MAE	Mean absolute error (Error absoluto medio)
Min Abs Error	Minimum absolute error (Mínimo error absoluto)
Max Abs Error	Maximum absolute error (Máximo error absolut)
r	Linear correlation coefficient (Coeficiente de correlación lineal)

Tabla 8. Variables del informe y su significado.

En la Ilustración 22 y en la Tabla 9 aparece el informe de la aplicación de la red neuronal MLP al grupo de datos de validación cruzada.

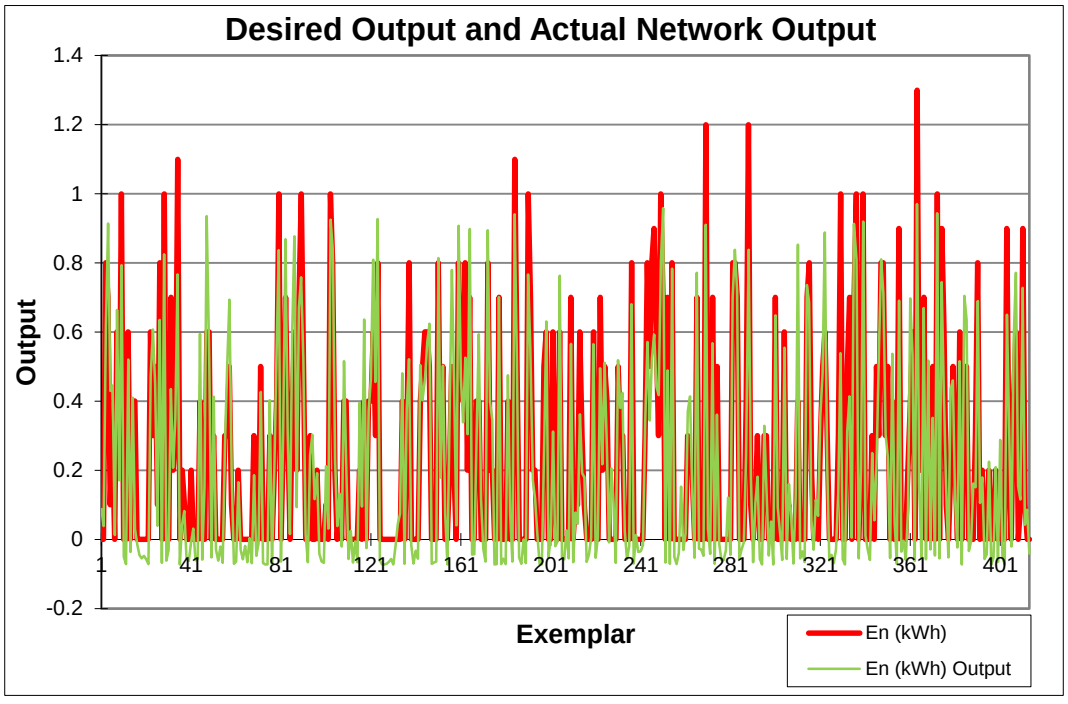


Ilustración 22. Informe gráfico de la aplicación de la red MLP al grupo de validación cruzada.

Performance	En (kWh)
MSE	0.015028327
NMSE	0.154128752
MAE	0.0922495
Min Abs Error	2.73445E-05
Max Abs Error	0.461370382
r	0.924570705

Tabla 9. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MLP al grupo de validación cruzada.

A continuación, en la Ilustración 23 y en la Tabla 10, se muestra el informe del grupo de datos de test que no ha sido utilizado anteriormente para el entrenamiento de la red neuronal, es decir, la aplicación de la red neuronal al año sin control (2012) para comprobar el resultado si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

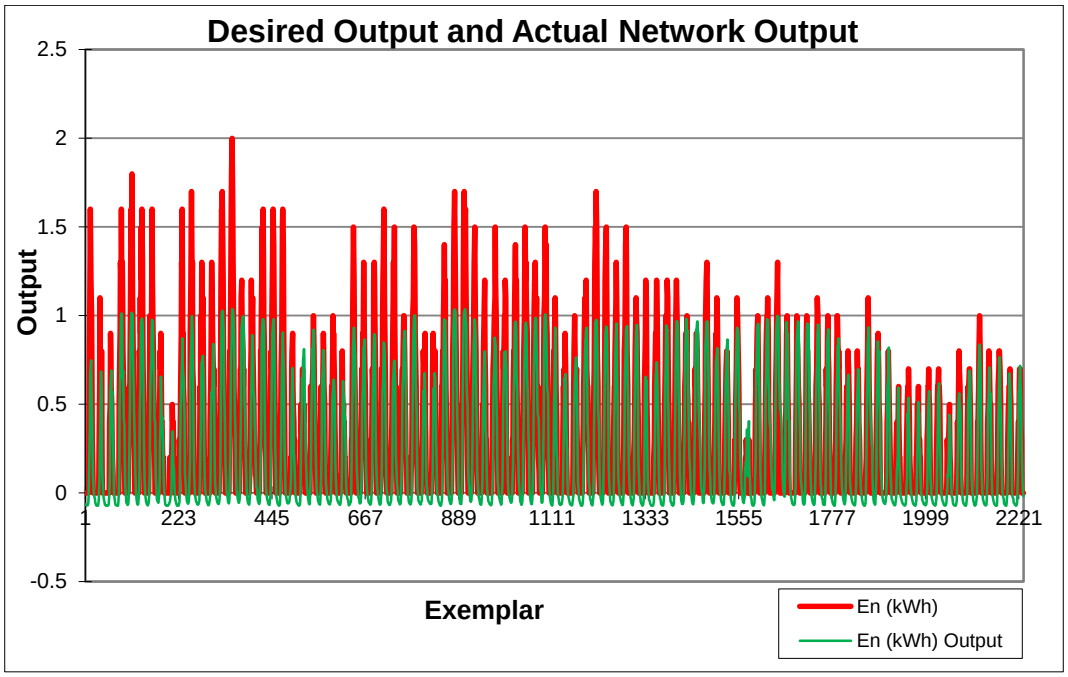


Ilustración 23. Informe gráfico de la aplicación de la red MLP al grupo de test.

Performance	En (kWh)
MSE	0.04307595
NMSE	0.238466137
MAE	0.142966519
Min Abs Error	6.44908E-05
Max Abs Error	0.995880459
r	0.893350771

Tabla 10. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MLP al grupo de test.

Se ha realizado también en el software Neurosolutions un estudio de la sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada, esto es, una medida de la influencia que tiene cada una de las entradas en el valor de la salida.

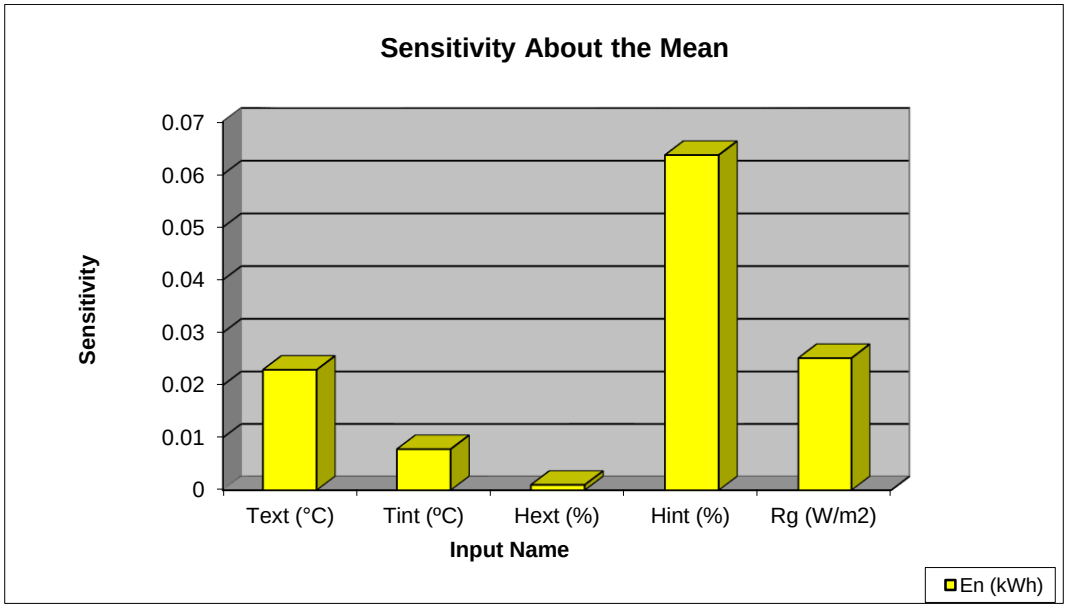


Ilustración 24. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red MLP.

Sensitivity	En (kWh)
Text (°C)	0.022960454
Tint (ºC)	0.007837492
Hext (%)	0.001020798
Hint (%)	0.063703725
Rg (W/m^2)	0.025176415

Tabla 11. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red MLP.

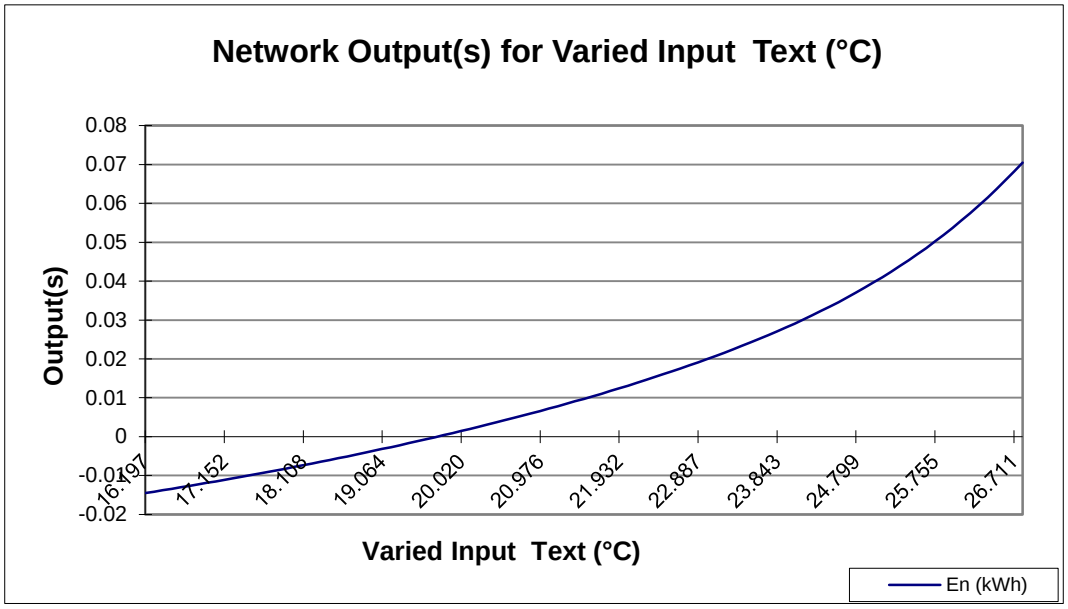


Ilustración 25. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red MLP.

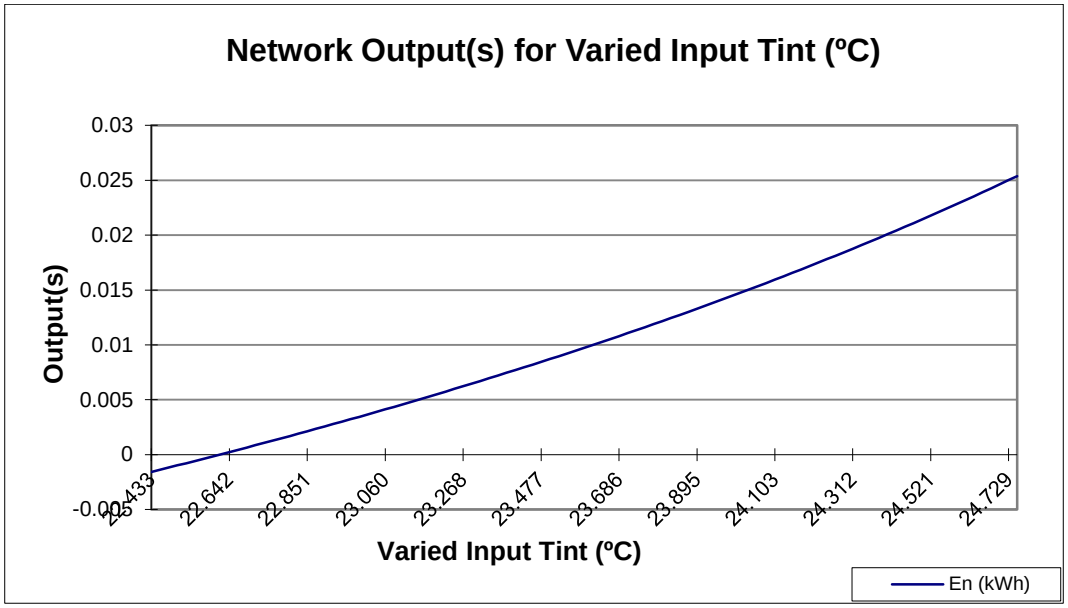


Ilustración 26. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red MLP.

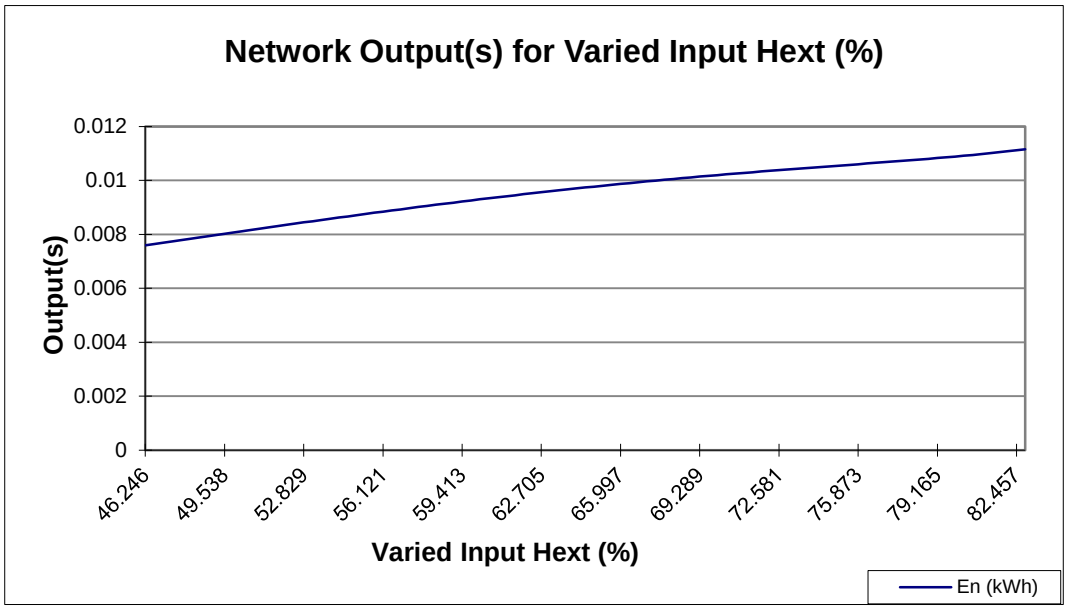


Ilustración 27. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red MLP.

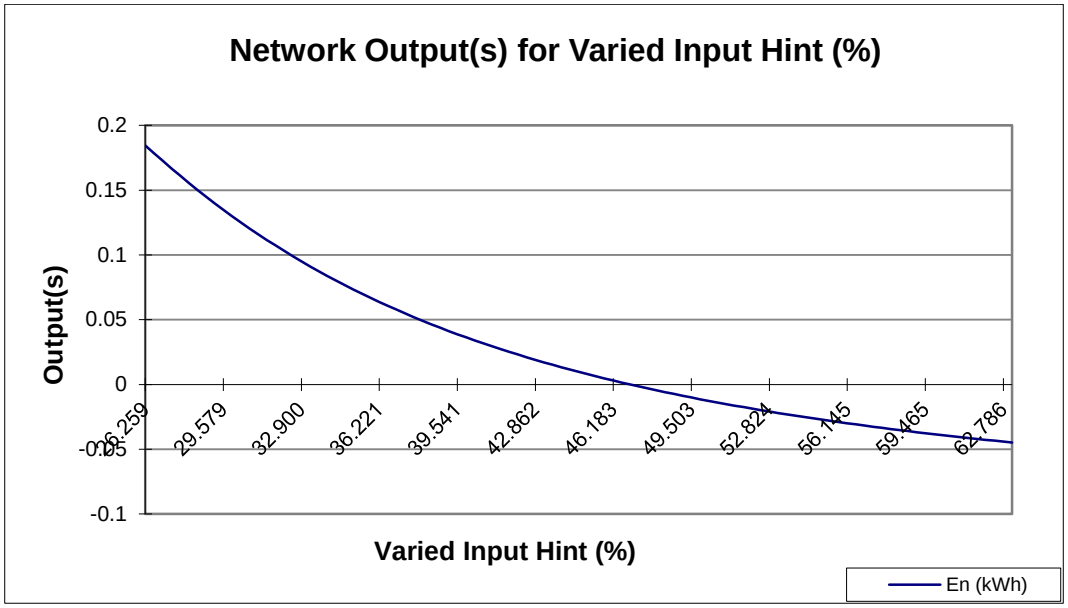


Ilustración 28. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red MLP.

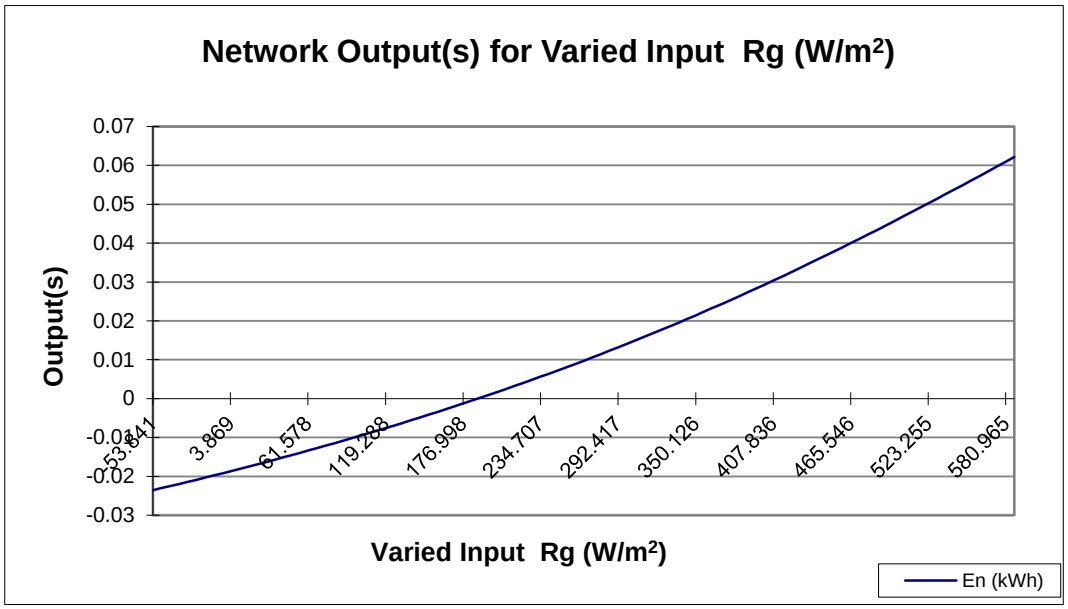


Ilustración 29. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red MLP.

Se aprecia en el análisis de sensibilidad que la máxima influencia es en la variable Humedad interior y la mínima en la Humedad exterior. Con valores intermedios, pero significativos, entre el máximo y el mínimo están la Temperatura exterior y la Radiación global.

6.2.3. Evaluación del error de la red MLP

Según el procedimiento de selección de una red en función del error calculamos el error de la presente según la Ecuación 1 con resultado mostrado en la Ecuación 2:

$$error_{MLP} = 0.25 \cdot 0.01246229 + 0.75 \cdot 0.015028327 = \ 0.01438681775$$

Ecuación 2. Error ponderado de la red MLP.

6.2.4. Aplicación de la red MLP al año sin control

Esta red MLP entrenada modela el comportamiento del sistema de control utilizado en la instalación domótica. A partir de los datos del año 2012, año sin control, se aplica la red neuronal para comprobar cuál hubiera sido el consumo energético si se hubiese empleado el sistema de control de persianas en ese año.

El resultado del test de la red neuronal, que modela el comportamiento del sistema de control, sobre el año 2012 queda representado en la Ilustración 30 donde se muestran los datos originales de ese año junto con los datos obtenidos por la red neuronal MLP que reflejan el comportamiento del sistema si hubiese existido el control.

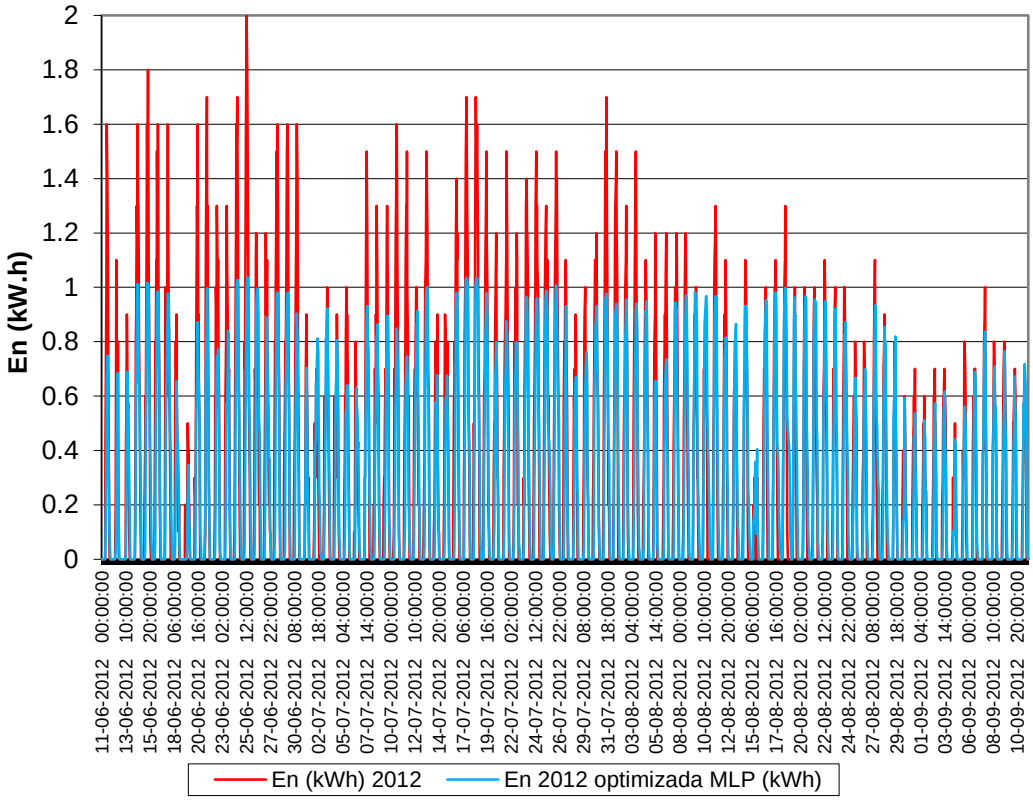


Ilustración 30. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal MLP simulando el control sobre el sistema.

En cuanto a los valores totales de energía consumida por el equipo de aire acondicionado en el periodo sin control (año 2012) fueron los siguientes:

- Año 2012 sin control: 738.5 kWh
- Año 2012 con control (red neuronal MLP): 569.1 kWh

Tomando el año 2012, la diferencia entre el consumo sin control y el consumo que habría habido utilizando el control se obtiene una diferencia de 738.5 – 569.1 = 169.4 kWh que en porcentaje supone un **ahorro del 22.9%**. Esto muestra la eficacia de la propuesta de control.

6.3. Entrenamiento de red RBF

Las redes neuronales de base radial, RBF (Radial Basis Function), determinan la salida en función de la distancia a un punto denominado centro (Orr & others, 1996). Son redes también hacia adelante (feedforward) como las MLP.

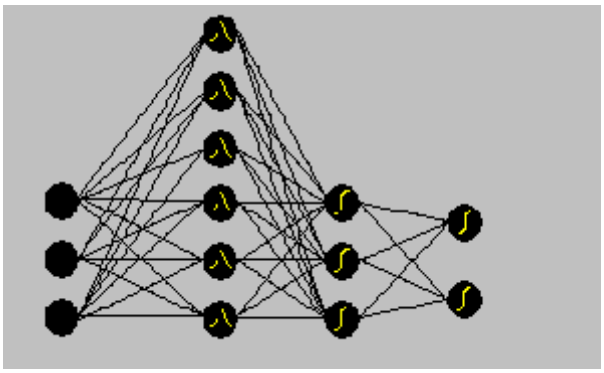


Ilustración 31. Arquitectura de una red RBF.

Las redes RBF son redes híbridas no lineales. La capa de la red RBF utiliza funciones de transferencia gaussianas en lugar de las funciones sigmoidales estándares empleadas por las redes MLP. Los centros y anchuras de las gaussianas son fijados por reglas de aprendizaje sin supervisión, y el aprendizaje supervisado se aplica a la capa de salida. Estas redes tienden a aprender mucho más rápido que las MLP.

De hecho, si se elige una regresión generalizada o una red probabilística, todos los pesos de la red pueden ser calculados analíticamente. En este caso, el número de centros de los clusters son, por definición, igual al número de individuos, y están configurados con la misma varianza.

En las redes estándar RBF, el segmento supervisado de la red sólo necesita producir una combinación lineal de la salida en la capa sin supervisión. Se puede añadir capas ocultas para hacer que el segmento supervisado sea un MLP en lugar de un perceptrón simple lineal.

6.3.1. Configuración de la red RBF

Los parámetros de configuración de la red neuronal introducidos en el software Neurosolutions para comparar los resultados y comprobar el incremento en el ahorro energético han sido los siguientes:

- Tipo de red: *Radial Basis Function*
- Configuración general de la red:
  - *Input PEs: 5*
  - *Output PEs: 1*
  - *Exemplars: 1698*
  - *Hidden Layers: 2*
  - *Cluster Centers: 25*
  - *Genetic Algorithm*
  - *Competitive rule: Conscience Full*
  - Metric: Euclidean
- Configuración de la capa oculta 1:
  - *Processing Elements: 28*
  - *Genetic Algorithm*
  - *Transfer: TanhAxon*
  - *Learning rule: Momentum*
    - *Step size: 0.01*
    - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa oculta 2:
  - *Processing Elements: 14*
  - *Genetic Algorithm*
  - *Transfer: TanhAxon*

    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*

- Configuración de la capa de salida:
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*

- Control de aprendizaje supervisado:
    - *Maximum Epochs: 100*
    - *Termination: MSE, Cross Val. Set, Increase*
    - *Weight Update: Batch*

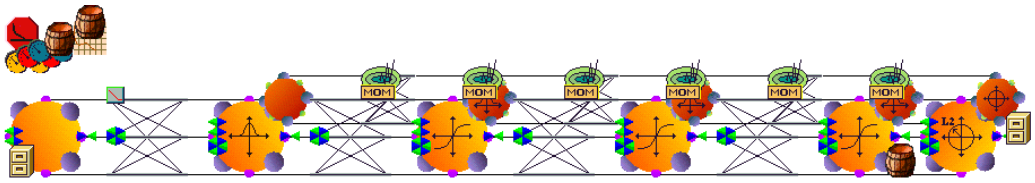


Ilustración 32. Red neuronal con topología RBF.

Los datos para el entrenamiento de la red se tomaron de los del intervalo indicado anteriormente del año 2013, año con control, y se organizaron de la siguiente manera:

- Datos de entrada:
    - Temperatura interior
    - Temperatura exterior
    - Humedad relativa interior

- Humedad relativa exterior
- Radiación global acumulada

- Datos deseados (salida):
  - Energía eléctrica consumida

En cuanto al volumen de datos por hora se distribuyen un 80% para el entrenamiento de la red y el 20% restante para validación cruzada tras reordenarlos aleatoriamente.

6.3.2. Informes del entrenamiento de la red RBF

El entrenamiento según algoritmos genéticos, basado en 25 generaciones de 25 individuos con optimización genética dio los siguientes resultados:

Como se ve en la Ilustración 33, el error en el mejor de los individuos ha ido disminuyendo conforme han evolucionado las generaciones de individuos hasta que a partir de la generación 7 no hay mejora.

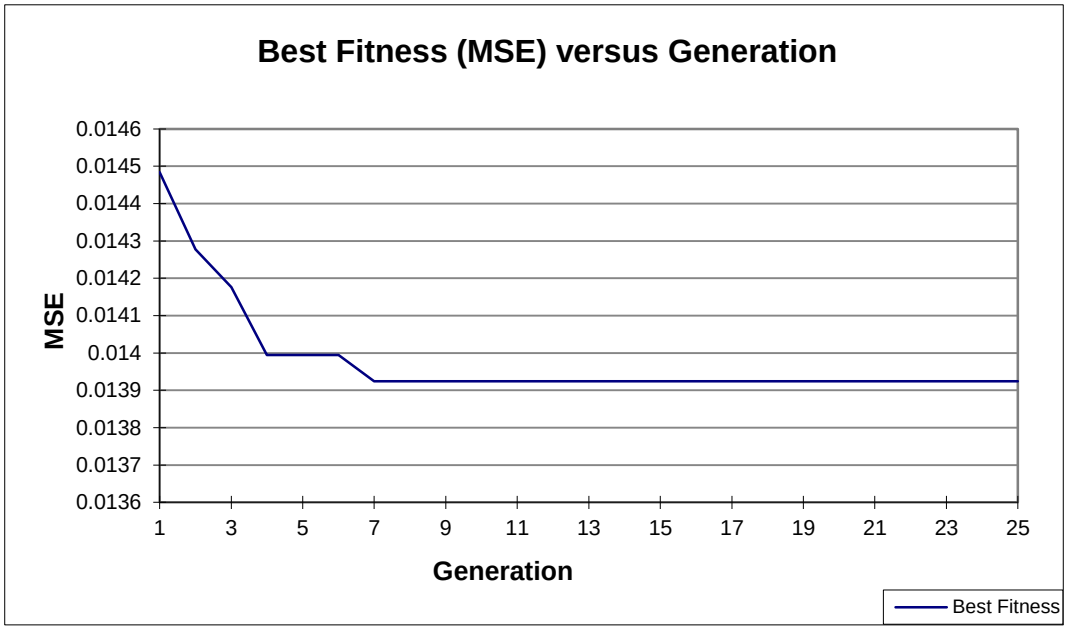


Ilustración 33. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red RBF.

En la Ilustración 34 se muestra la media de los 25 individuos de la generación donde se aprecia que la primera generación era muy mala pero con operadores de cruce se van concentrando los mejores bajando progresivamente la media.

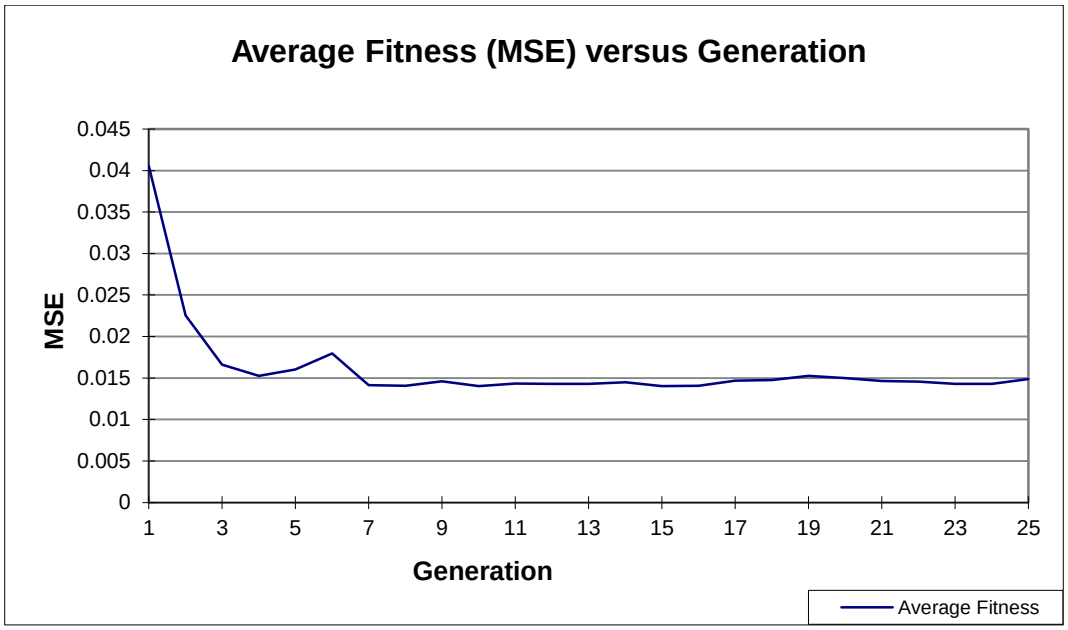


Ilustración 34. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación en la red RBF.

Optimization Summary	*Best Fitness*	*Average Fitness*
Generation #	7	15
Minimum MSE	0.013923945	0.014018586
Final MSE	0.013923945	0.01487344

Tabla 12. Resumen de la optimización genética en la red RBF.

En la Ilustración 35 se puede ver la comparativa de los datos originales con los que la red neuronal obtiene tras el ajuste de la misma con los datos de entrenamiento.

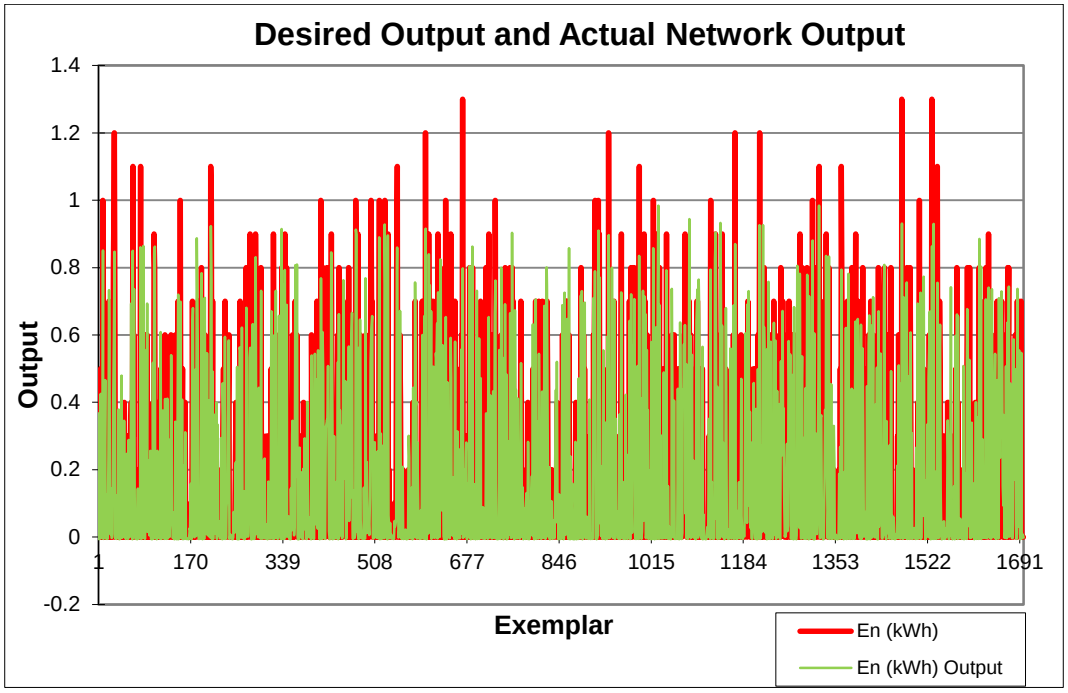


Ilustración 35. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal RBF.

La Tabla 13 muestra los valores de errores de la red RBF entrenada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.011653821
NMSE	0.147405716
MAE	0.063741409
Min Abs Error	1.98235E-05
Max Abs Error	0.64639773
r	0.923360502

Tabla 13. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RBF al grupo de entrenamiento.

En la Ilustración 33 y en la Tabla 14 aparece el informe de la aplicación de la red neuronal RBF al grupo de datos de validación cruzada.

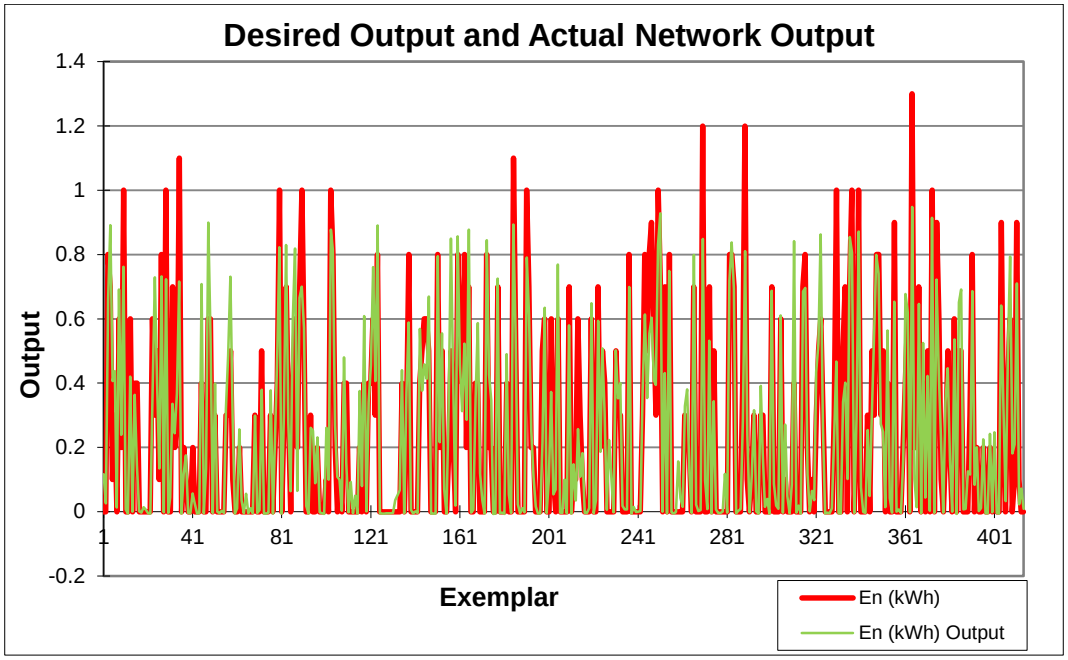


Ilustración 36. Informe gráfico de la aplicación de la red RBF al grupo de validación cruzada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.014525597
NMSE	0.148972813
MAE	0.076908602
Min Abs Error	2.36602E-05
Max Abs Error	0.532991806
r	0.922579174

Tabla 14. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RBF al grupo de validación cruzada.

A continuación, en la Ilustración 37 y en la Tabla 15, se muestra el informe del grupo de datos de test que no ha sido utilizado anteriormente para el entrenamiento de la red neuronal, es decir, la aplicación de la red neuronal al año sin control (2012) para comprobar el resultado si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

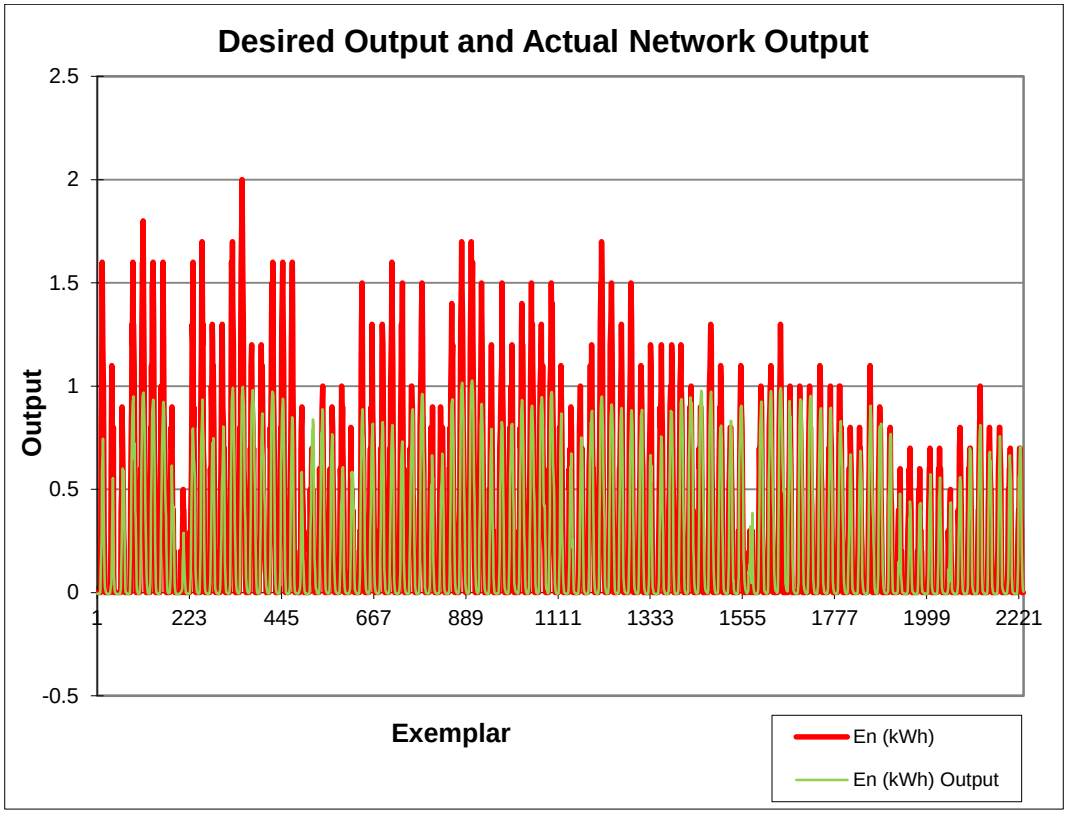


Ilustración 37. Informe gráfico de la aplicación de la red RBF al grupo de test.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.045432781
NMSE	0.251513428
MAE	0.129453743
Min Abs Error	5.53804E-07
Max Abs Error	1.047675501
r	0.887855532

Tabla 15. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RBF al grupo de test.

El estudio de sensibilidad de la variable de salida frente a las variables de entrada en la red RBF ha dado los siguientes resultados:

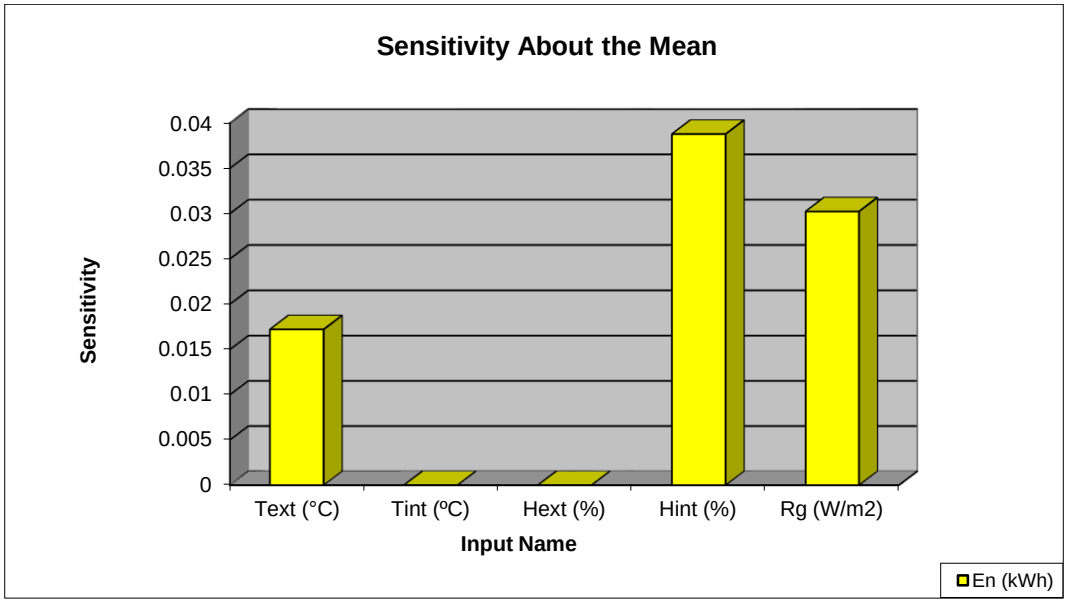


Ilustración 38. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red RBF.

Sensitivity	*En (kWh)*
Text (°C)	0.017225455
Tint (ºC)	1.05367E-09
Hext (%)	1.05367E-09
Hint (%)	0.03877959
Rg (W/m^2)	0.030234022

Tabla 16. Valores de sensibilidad de salida frente a las variables de entrada para la red RBF.

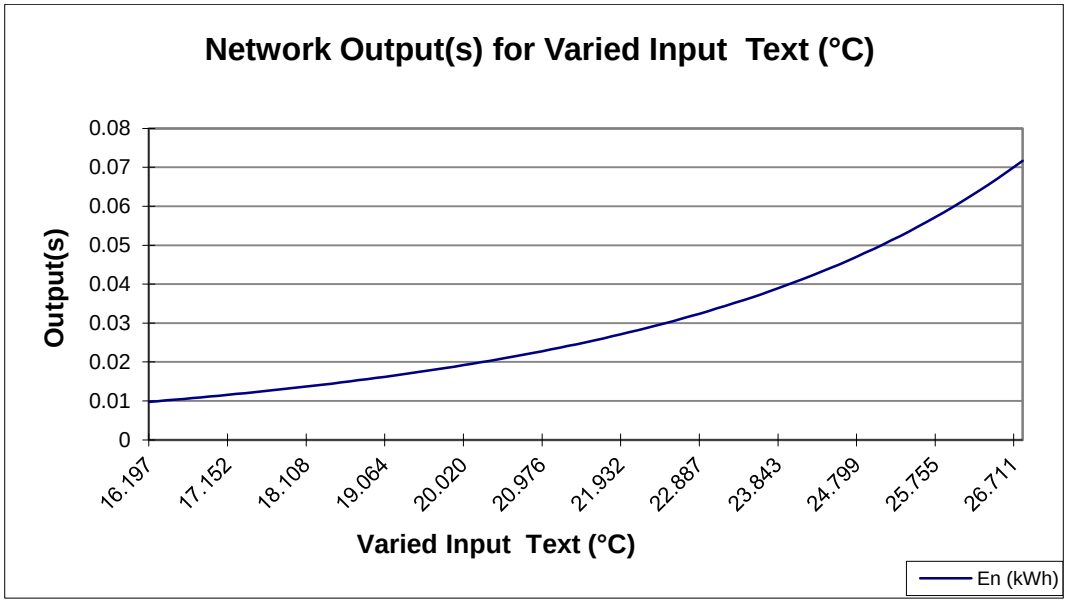


Ilustración 39. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red RBF.

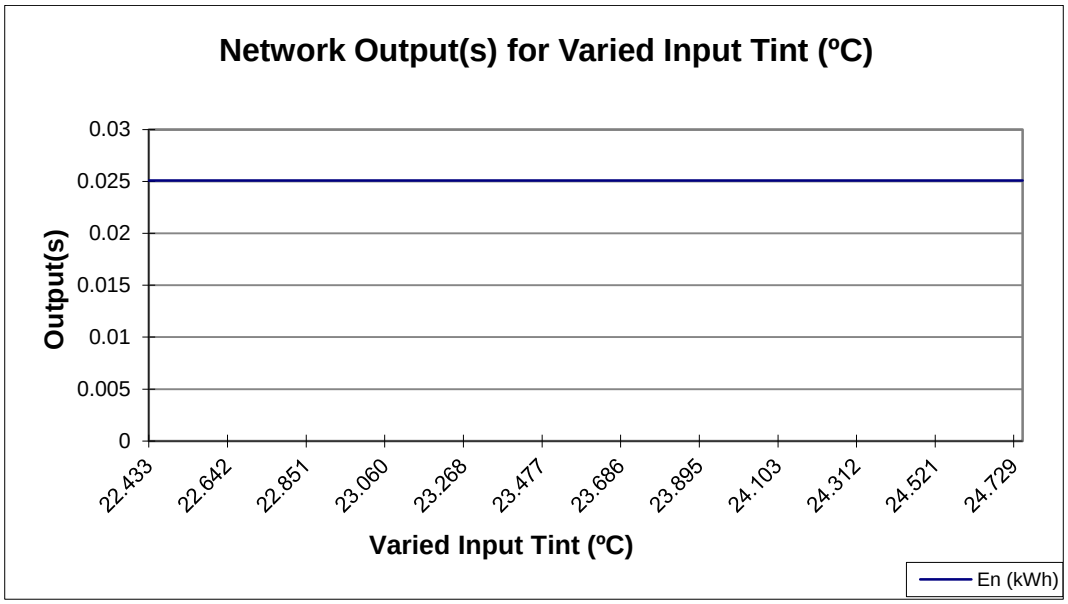


Ilustración 40. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red RBF.

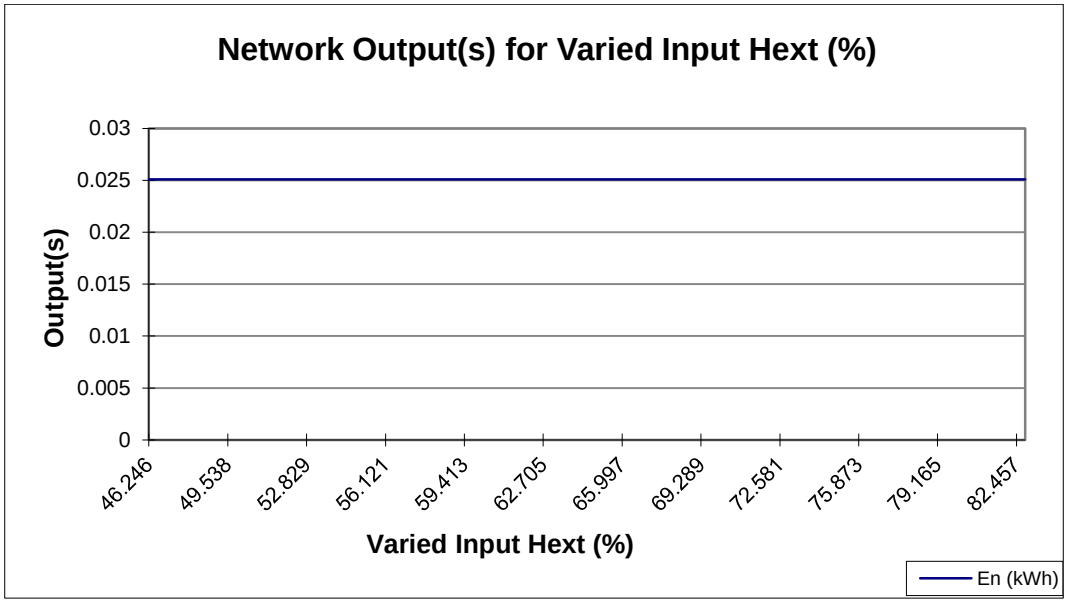


Ilustración 41. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red RBF.

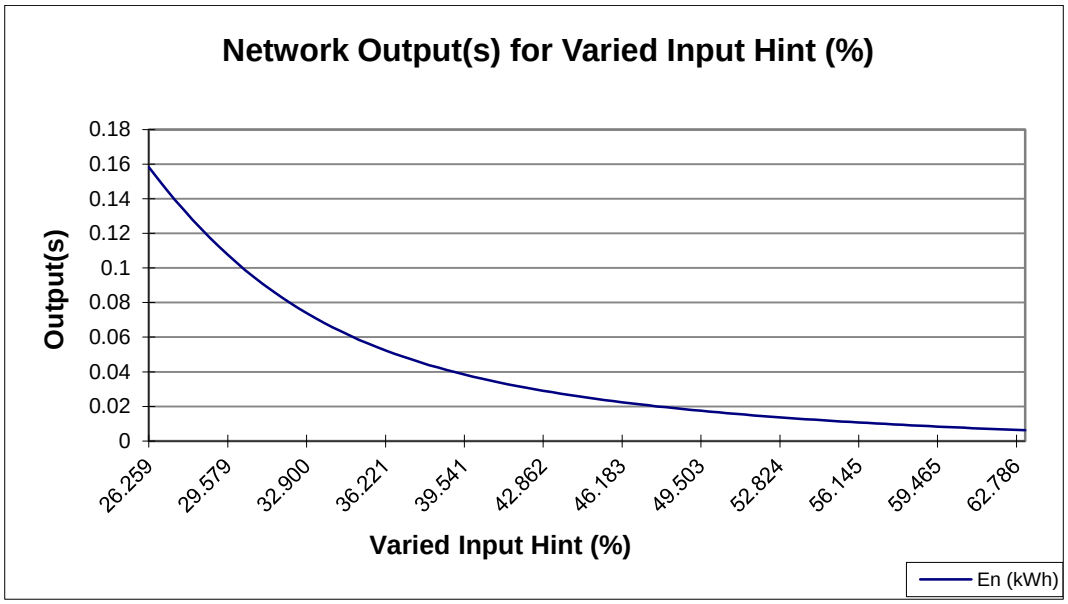


Ilustración 42. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red RBF.

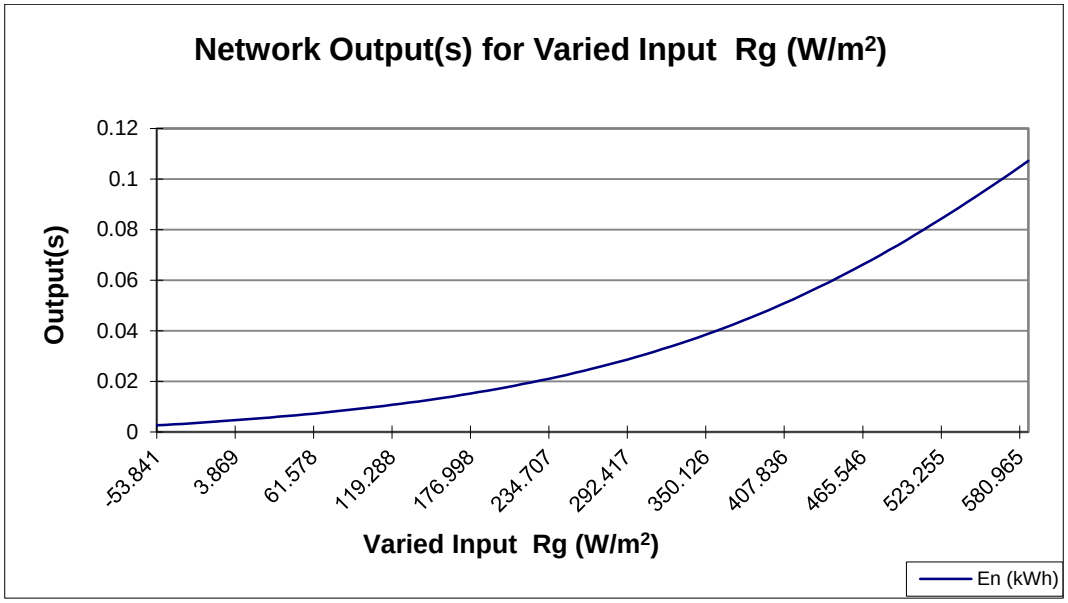


Ilustración 43. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red RBF.

El análisis muestra la máxima influencia de la variable Humedad interior y Radiación global sobre la salida y la mínima influencia de la Temperatura exterior y la Humedad exterior.

6.3.3. Evaluación del error de la red RBF

Según el procedimiento de selección de una red en función del error calculamos el error de la presente según la Ecuación 1 en la Ecuación 3:

$$error_{RBF} = 0.25 \cdot 0.011653821 + 0.75 \cdot 0.014525597 = \ 0.013807653$$

Ecuación 3. Error ponderado de la red RBF.

6.3.4. Aplicación de la red RBF al año sin control

Esta red RBF entrenada modela el comportamiento del sistema de control utilizado en la instalación domótica. A partir de los datos del año 2012, año sin control, se aplica la red neuronal para comprobar cuál

hubiera sido el consumo energético si se hubiese empleado el sistema de control de persianas en ese año.

En la Ilustración 44 se visualizan los datos correspondientes al consumo real del año 2012 (año sin algoritmo de control) más los resultados obtenidos de la aplicación de la red neuronal RBF a esos datos para comparar si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

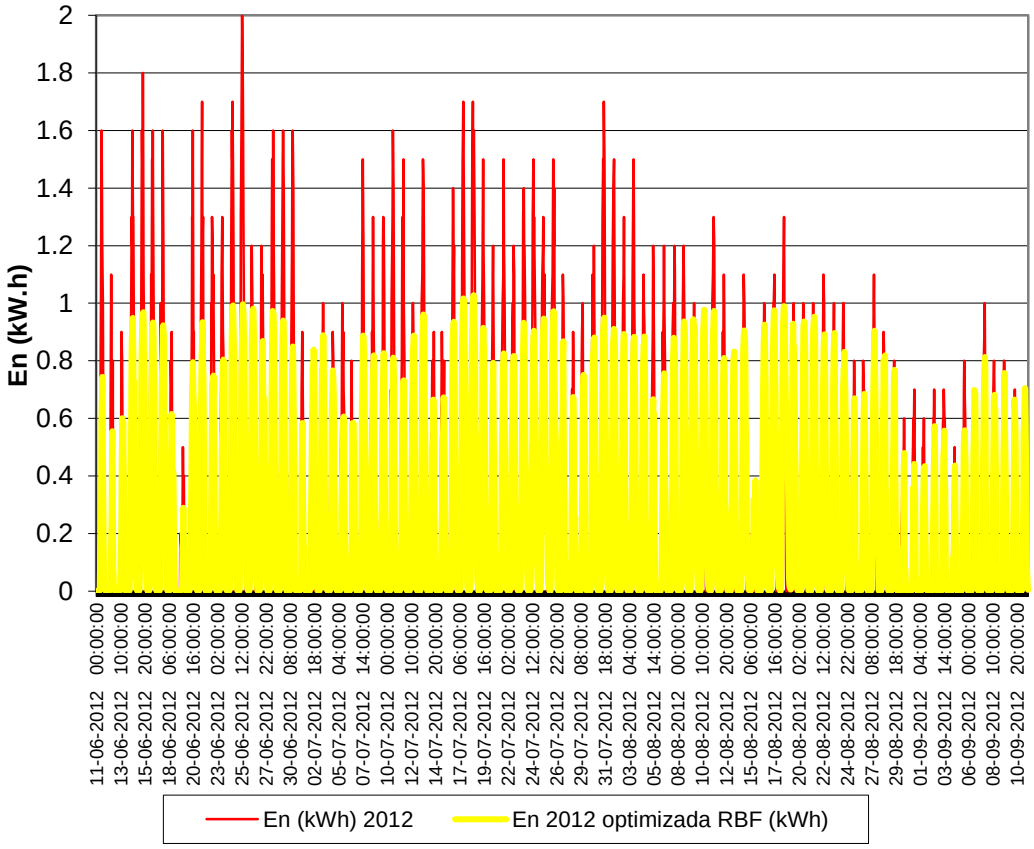


Ilustración 44. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal RBF simulando el control sobre el sistema.

La comparativa de los valores totales de energía consumida por el equipo de aire acondicionado en el periodo sin control (año 2012) da los siguientes resultados:

- Año 2012 sin control: 738.5 kWh
- Año 2012 con control (red neuronal RBF): 588.0 kWh

Tomando el año 2012, la diferencia entre el consumo sin control y el consumo que habría habido utilizando el control según la red RBF se obtiene una diferencia de 738.5 – 588.0 = 150.5 kWh que en porcentaje supone un **ahorro del 20.4%**. Esto muestra la eficacia de la propuesta de control.

6.4. Entrenamiento de red GFF

Las redes GFF (Generalized FeedForward) son una generalización de las redes MLP en las cuales se pueden crear conexiones entre capas no contiguas (Bouzerdoum & Mueller, 2003).

En teoría, una red MLP puede resolver cualquier problema que una red feedfoward generalizada pueda resolver. En la práctica, sin embargo, las redes GFF a menudo resuelven el problema de manera mucho más eficiente. Una red MLP estándar requiere cientos de veces más épocas de formación que una red GFF que contenga el mismo número de elementos de procesamiento.

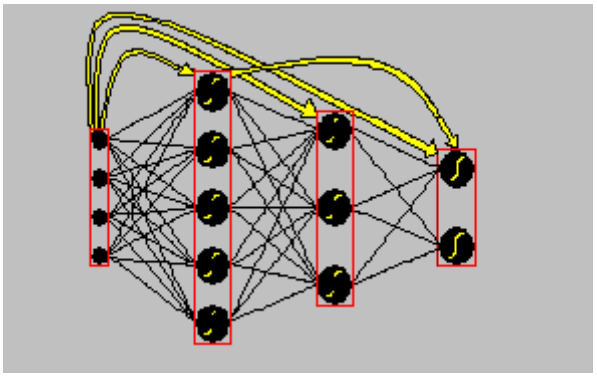


Ilustración 45. Arquitectura de una red GFF.

6.4.1. Configuración de la red GFF

Los parámetros de configuración de la red neuronal introducidos en el software Neurosolutions para comparar los resultados y comprobar el incremento en el ahorro energético han sido los siguientes:

- Tipo de red: *Generalized FeedForward*

- Configuración general de la red:
    - *Input PEs: 5*
    - *Output PEs: 1*
    - *Exemplars: 1698*
    - *Hidden Layers: 2*
- Configuración de la capa oculta 1:
    - *Processing Elements: 28*
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa oculta 2:
    - *Processing Elements: 14*
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa de salida:
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*

- *Momentum: 0.7*

- Control de aprendizaje supervisado:
  - *Maximum Epochs: 3000*
  - *Termination: MSE, Cross Val. Set, Increase*
  - *Weitgh Update: Batch*

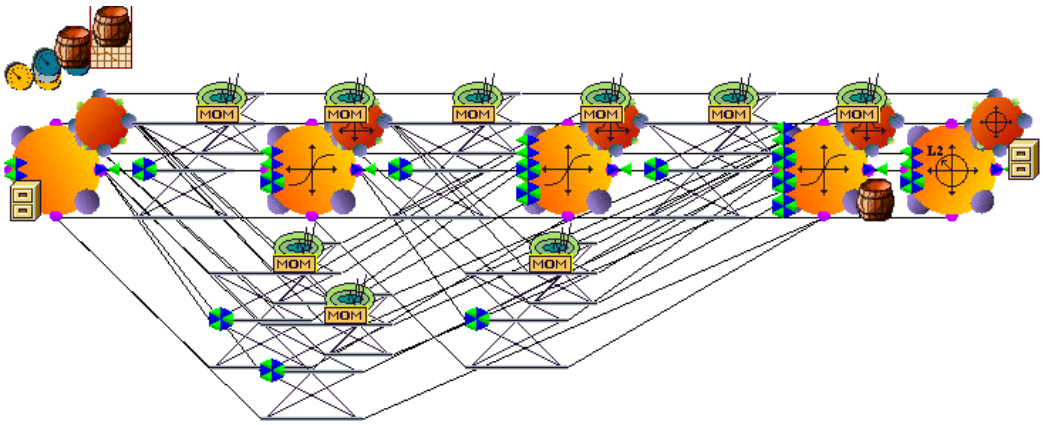


Ilustración 46. Red neuronal con topología GFF.

Los datos para el entrenamiento de la red se tomaron de los del intervalo indicado anteriormente del año 2013, año con control, y se organizaron de la siguiente manera:

- Datos de entrada:
  - Temperatura interior
  - Temperatura exterior
  - Humedad relativa interior
  - Humedad relativa exterior
  - Radiación global acumulada
- Datos deseados (salida):
  - Energía eléctrica consumida

En cuanto al volumen de datos por hora se distribuyen un 80% para el entrenamiento de la red y el 20% restante para validación cruzada tras reordenarlos aleatoriamente.

6.4.2. Informes del entrenamiento de la red GFF

El entrenamiento según algoritmos genéticos, basado en 20 generaciones de 20 individuos con optimización genética dio los siguientes resultados:

Como se ve en la Ilustración 47, el error en el mejor de los individuos ha ido disminuyendo conforme han evolucionado las generaciones de individuos hasta que a partir de la generación 16 no hay mejora.

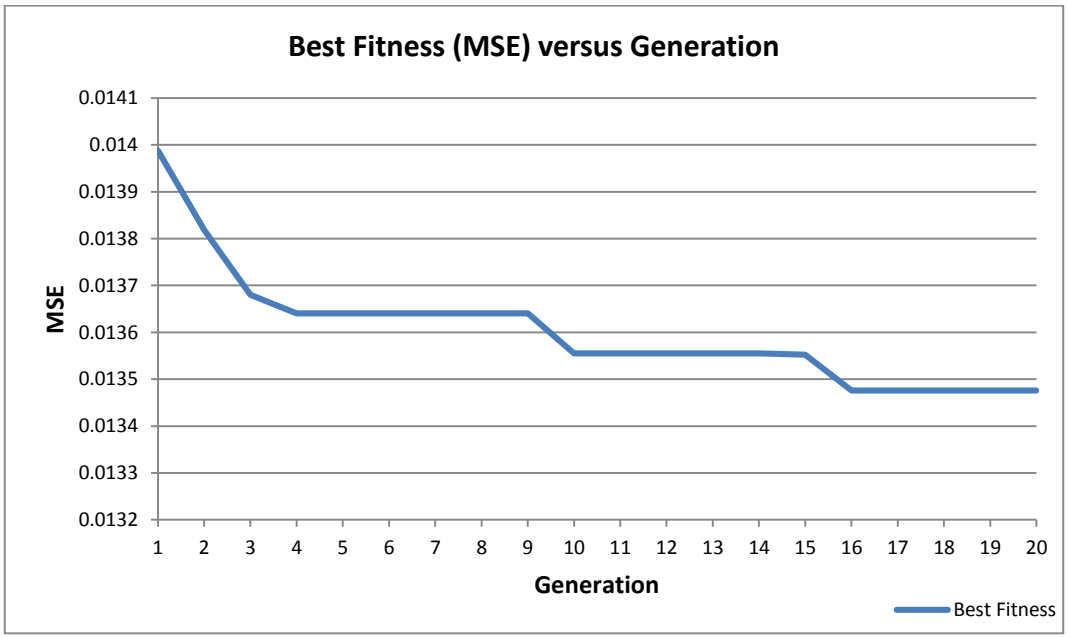


Ilustración 47. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red GFF.

En la Ilustración 48 se muestra la media de los 20 individuos de la generación donde se aprecia que la primera generación era muy mala pero con operadores de cruce se van concentrando los mejores bajando progresivamente la media.

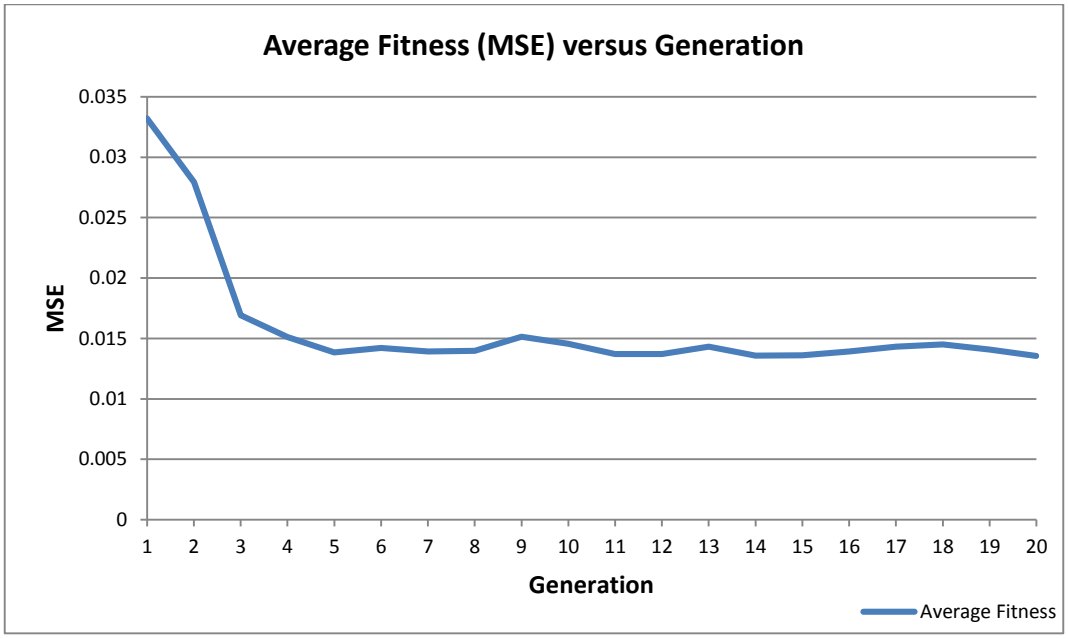


Ilustración 48. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red GFF.

En la Tabla 17 se resumen los resultados anteriores:

Optimization Summary	*Best Fitness*	*Average Fitness*
Generation #	16	20
Minimum MSE	0.013475691	0.013540776
Final MSE	0.013475691	0.013540776

Tabla 17. Resumen de la optimización genética en la red GFF.

En la Ilustración 49 se puede ver la comparativa de los datos originales con los que la red neuronal GFF obtiene tras el ajuste de la misma con los datos de entrenamiento.

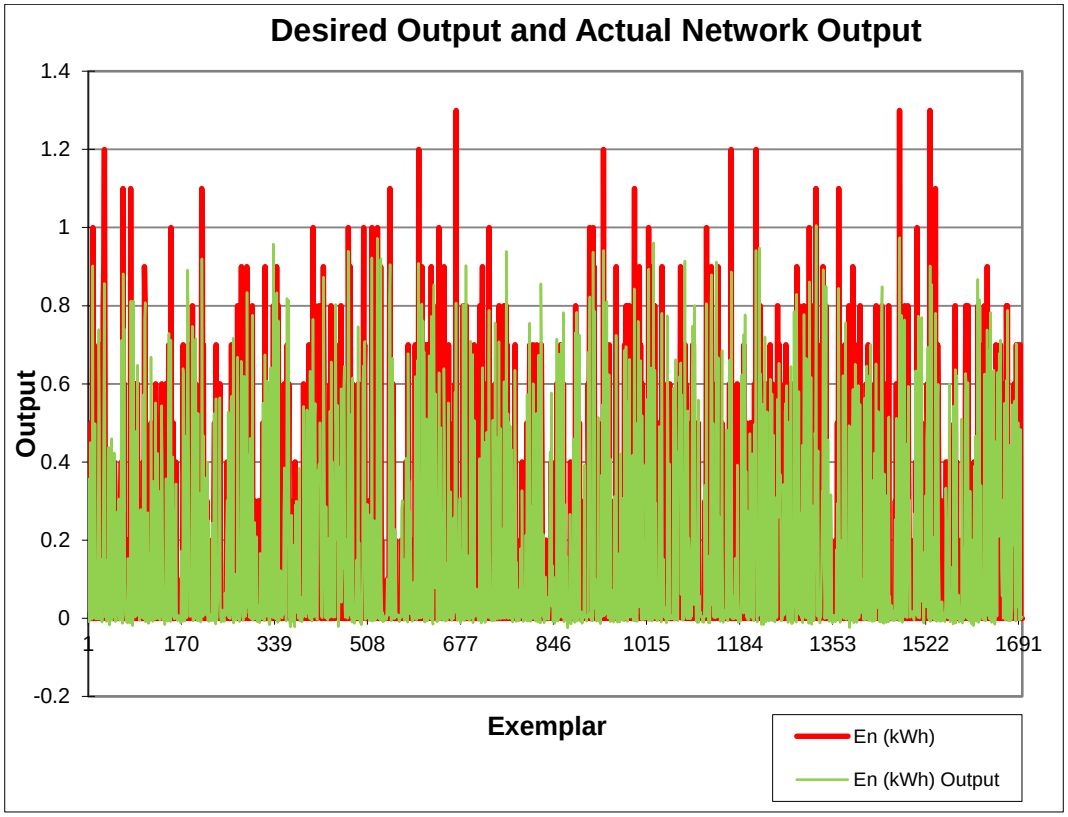


Ilustración 49. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal GFF.

La Tabla 18 muestra los valores de errores de la red GFF entrenada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.010576989
NMSE	0.133785193
MAE	0.060189727
Min Abs Error	4.23595E-06
Max Abs Error	0.600000214
r	0.930708988

Tabla 18. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red GFF al grupo de entrenamiento.

En la Ilustración 50 y en la Tabla 19 aparece el informe de la aplicación de la red neuronal GFF al grupo de datos de validación cruzada.

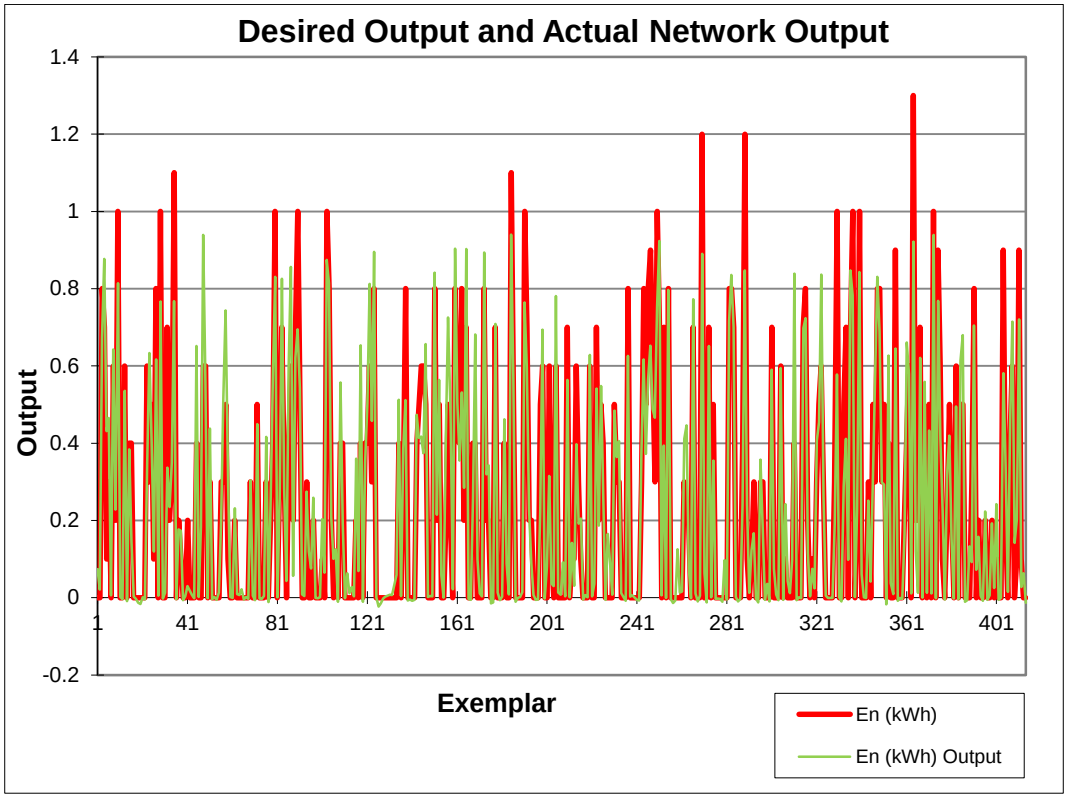


Ilustración 50. Informe gráfico de la aplicación de la red GFF al grupo de validación cruzada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.014057974
NMSE	0.144176929
MAE	0.076044785
Min Abs Error	6.65229E-05
Max Abs Error	0.438894239
r	0.92510912

Tabla 19. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red GFF al grupo de validación cruzada.

A continuación, en la Ilustración 51 y en la Tabla 20, se muestra el informe del grupo de datos de test que no ha sido utilizado anteriormente para el entrenamiento de la red neuronal, es decir, la aplicación de la red neuronal al año sin control (2012) para comprobar el resultado si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

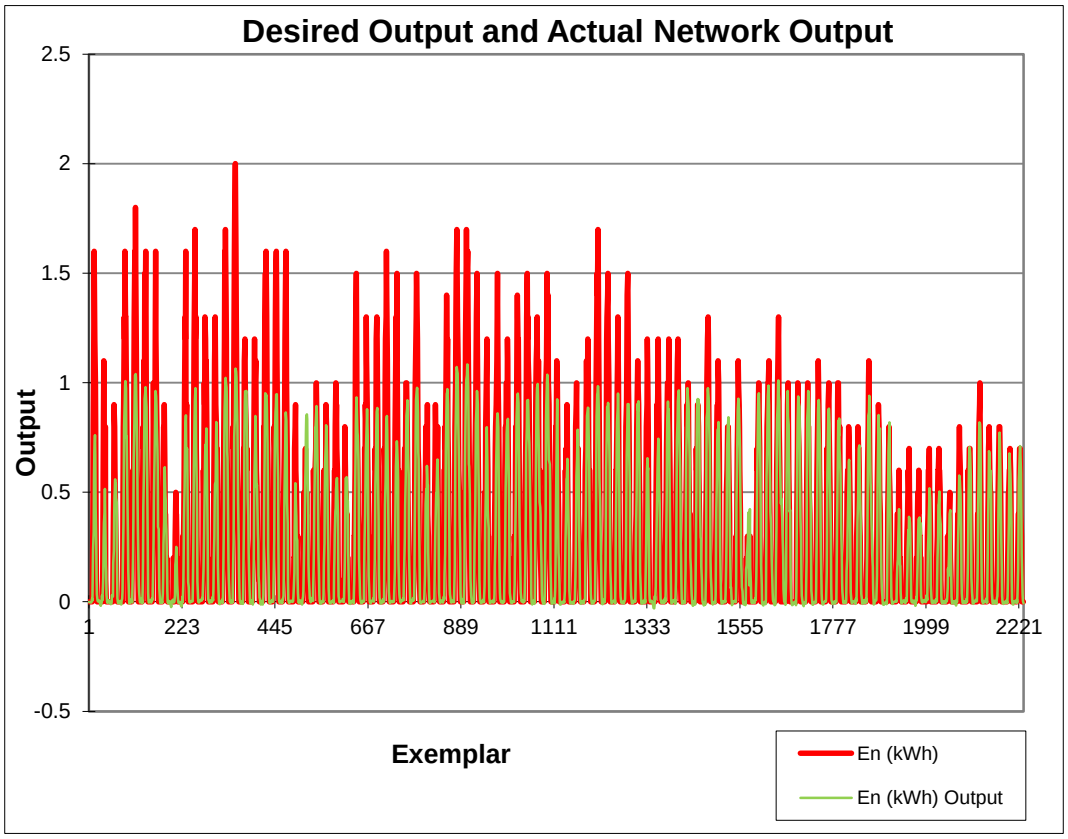


Ilustración 51. Informe gráfico de la aplicación de la red GFF al grupo de test.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.042186923
NMSE	0.233544532
MAE	0.125460921
Min Abs Error	8.16312E-07
Max Abs Error	1.031379038
r	0.896844586

Tabla 20. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red GFF al grupo de test.

El estudio de sensibilidad de la variable de salida frente a las variables de entrada dio los siguientes resultados:

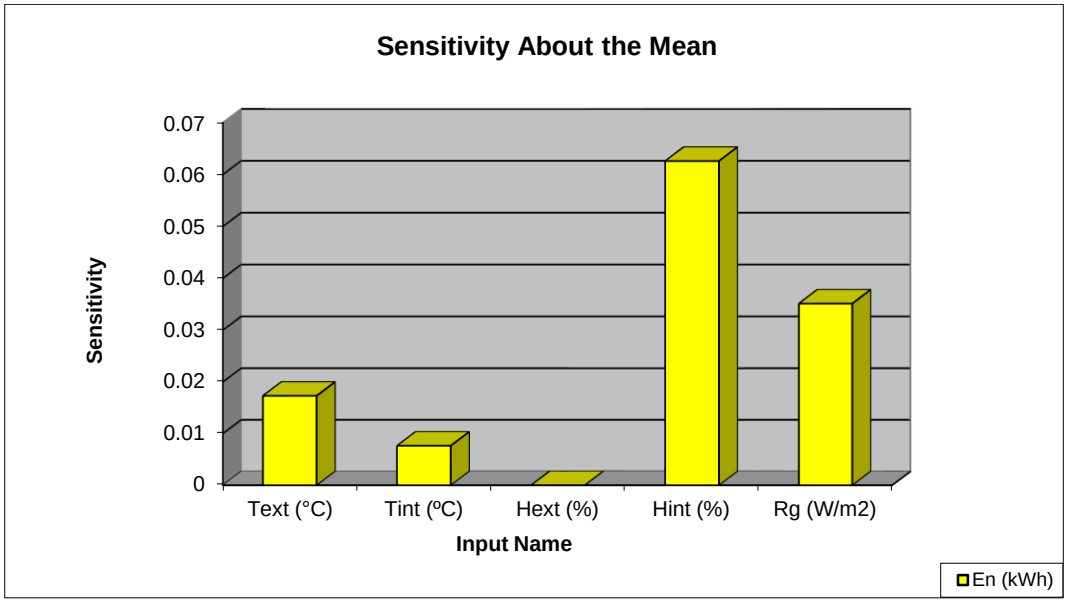


Ilustración 52. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red GFF.

Sensitivity	*En (kWh)*
Text (°C)	0.017330325
Tint (ºC)	0.007656328
Hext (%)	0
Hint (%)	0.062638048
Rg (W/m^2)	0.035140869

Tabla 21. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red GFF.

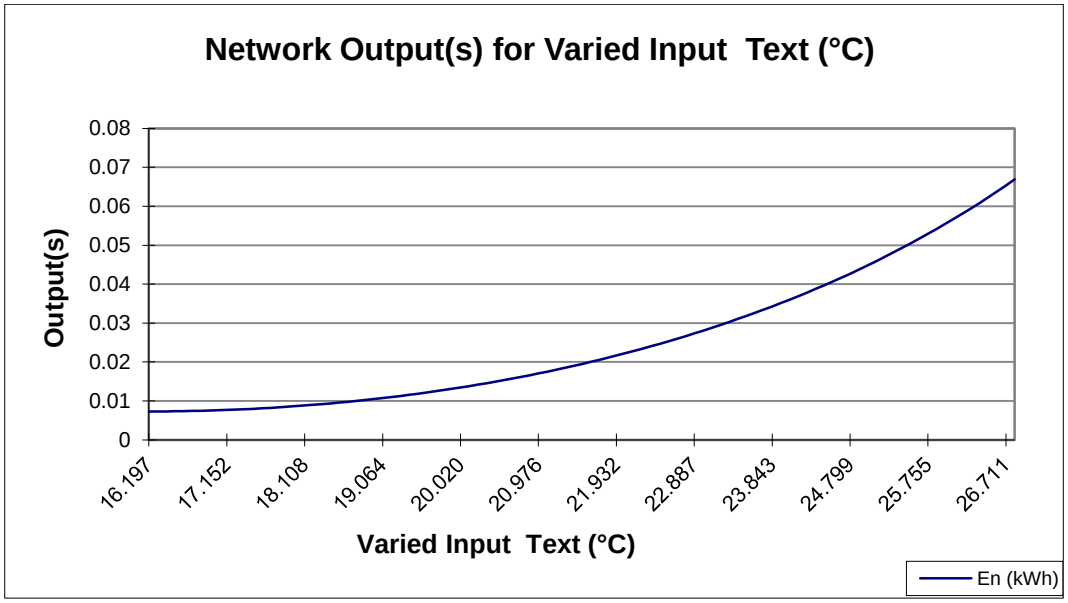


Ilustración 53. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red GFF.

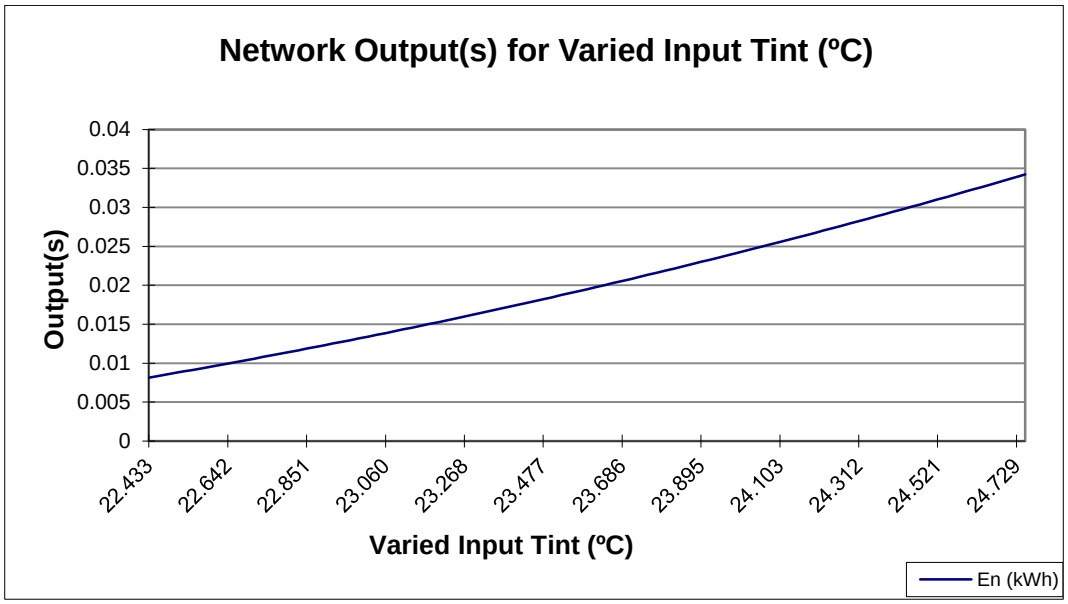


Ilustración 54 Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red GFF.

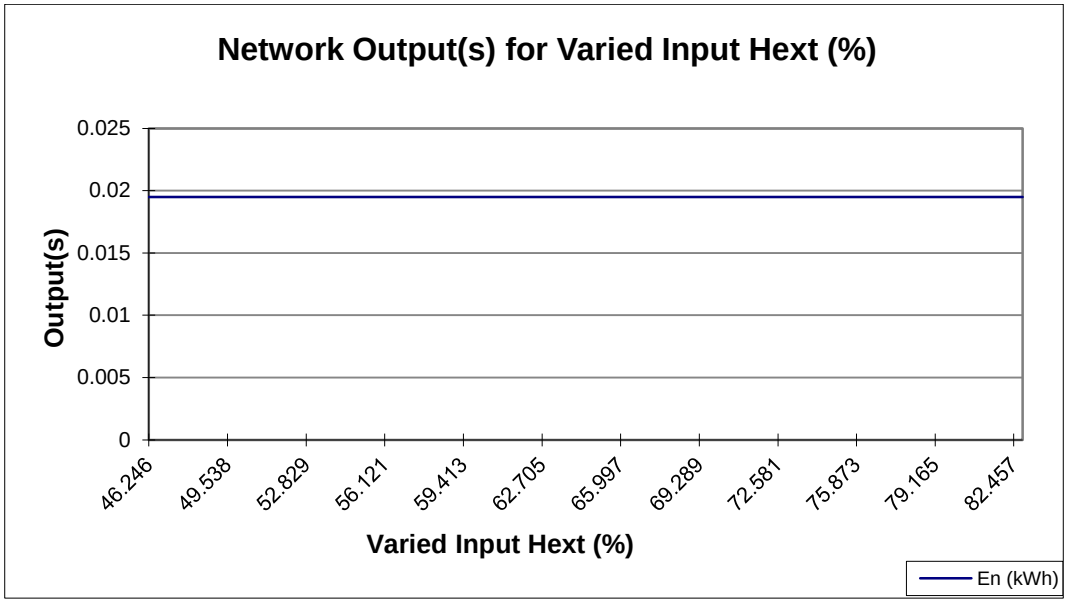


Ilustración 55. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red GFF.

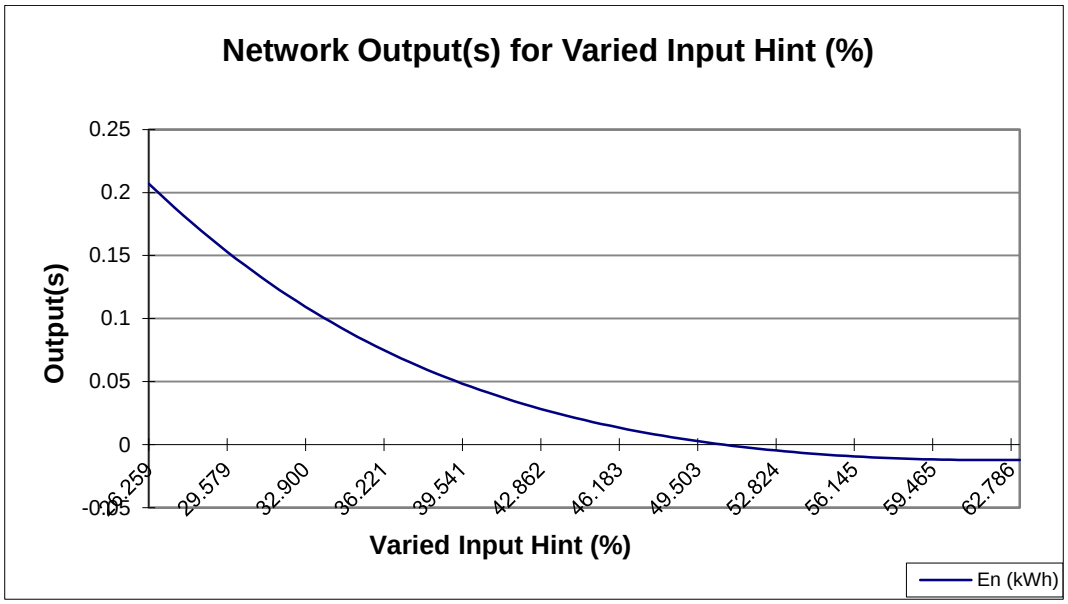


Ilustración 56. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red GFF.

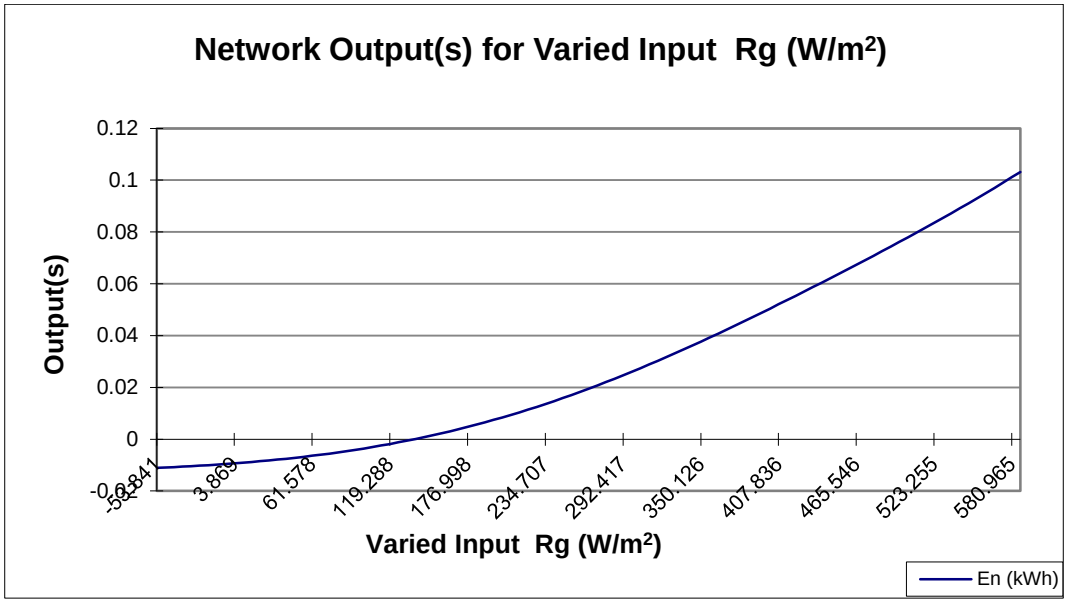


Ilustración 57. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red GFF.

Se aprecia en el análisis de sensibilidad que la máxima influencia es en la variable Humedad interior y la mínima en la Humedad exterior. Con valores intermedios, pero significativos, entre el máximo y el mínimo están la Temperatura exterior y la Radiación global.

6.4.3. Evaluación del error de la red GFF

Según el procedimiento de selección de una red en función del error calculamos el error de la presente según la Ecuación 1 mostrando el resultado en la Ecuación 4:

$$error_{GFF} = 0.25 \cdot 0.010576989 + 0.75 \cdot \ 0.014057974 = \ 0.01318772775$$

Ecuación 4. Error ponderado de la red GFF.

6.4.4. Aplicación de la red GFF al año sin control

La red GFF entrenada modela el comportamiento del sistema de control utilizado en la instalación domótica. Tomando los datos del año

sin control, el 2012, al aplicar esta red comprobamos el efecto que hubiera tenido el sistema de control si se hubiera implementado en ese año.

El resultado del test de la red neuronal, que modela el comportamiento del sistema de control, sobre el año 2012 queda representado en la Ilustración 58 donde se muestran los datos originales de ese año junto con los datos obtenidos por la red neuronal GFF que reflejan el comportamiento del sistema si hubiese existido el control.

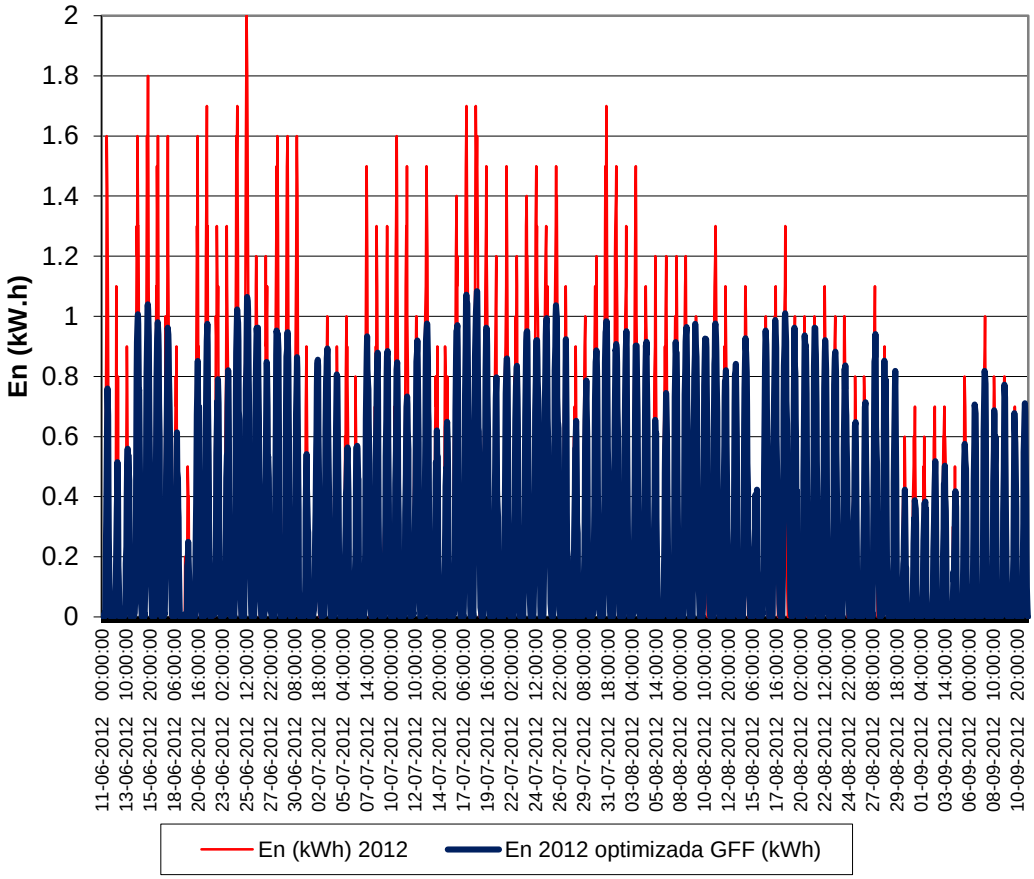


Ilustración 58. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal GFF simulando el control sobre el sistema.

En cuanto a los valores totales de energía consumida por el equipo de aire acondicionado en el periodo sin control (año 2012) fueron los siguientes:

- Año 2012 sin control: 738.5 kWh
- Año 2012 con control (red neuronal GFF): 597.1 kWh

Tomando el año 2012, la diferencia entre el consumo sin control y el consumo que habría habido utilizando el control se obtiene una diferencia de 738.5 – 597.1 = 141.4 kWh que en porcentaje supone un **ahorro del 19.1%**. Esto muestra la eficacia de la propuesta de control.

6.5. Entrenamiento de red TLRN

Las redes TLRN (Time-Lag Recurrent Network) son redes neuronales MLP extendidas con una estructura de memoria que puede considerarse como un preprocesador de la entrada (Sun & Marko, 1998).

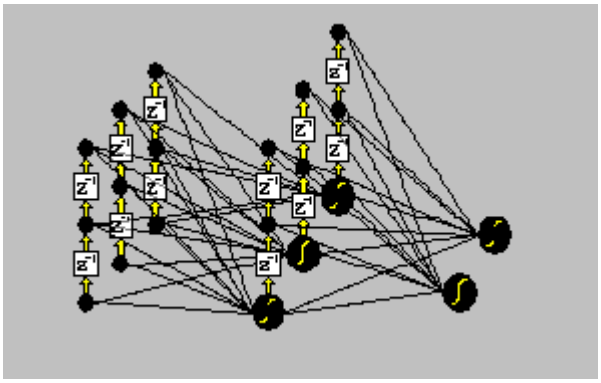


Ilustración 59. Arquitectura de una red TLRN.

La mayoría de los datos del mundo real contienen información en su estructura temporal, es decir, cómo cambian los datos con el tiempo. Sin embargo, la mayoría de las redes neuronales son puramente clasificadores estáticos. Las redes TLRN son una referencia en predicción no lineal de series de tiempo, identificación de sistemas y clasificación de patrones temporales.

6.5.1. Configuración de la red TLRN

Los parámetros de configuración de la red neuronal introducidos en el software Neurosolutions para comparar los resultados y comprobar el incremento en el ahorro energético han sido los siguientes:

- Tipo de red: *Time-Lag Recurrent Network*
- Configuración general de la red:
  - *Input PEs: 5*
  - *Output PEs: 1*
  - *Exemplars: 1698*
  - *Hidden Layers: 2*
  - *Depth in samples: 10*
  - *Trajectory Lenght: 50*
- Configuración de la capa oculta 1:
  - *Processing Elements: 4*
  - *Genetic Algorithm*
  - *Transfer: TanhAxon*
  - *Learning rule: Momentum*
    - *Step size: 0.01*
    - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa oculta 2:
  - *Processing Elements: 4*
  - *Genetic Algorithm*
  - *Transfer: TanhAxon*
  - *Learning rule: Momentum*
    - *Step size: 0.01*

        - *Momentum: 0.7*

- Configuración de la capa de salida:
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Control de aprendizaje supervisado:
    - *Maximum Epochs: 1000*
    - *Termination: MSE, Cross Val. Set, Increase*
    - *Weight Update: Batch*

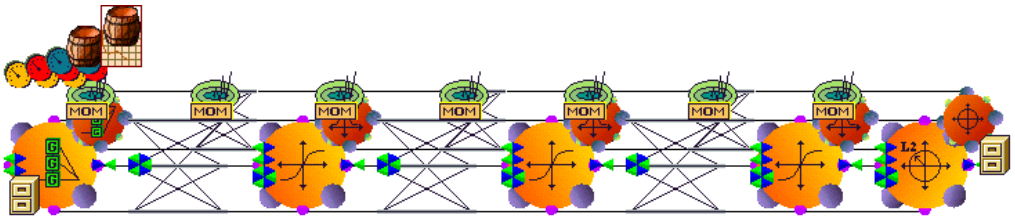


Ilustración 60. Red neuronal con arquitectura TLRN.

Los datos para el entrenamiento de la red se tomaron de los del intervalo indicado anteriormente del año 2013, año con control, y se organizaron de la siguiente manera:

- Datos de entrada:
    - Temperatura interior
    - Temperatura exterior
    - Humedad relativa interior
    - Humedad relativa exterior

- Radiación global acumulada

- Datos deseados (salida):
  - Energía eléctrica consumida

En cuanto al volumen de datos por hora se distribuyen un 80% para el entrenamiento de la red y el 20% restante para validación cruzada tras reordenarlos aleatoriamente.

6.5.2. Informes del entrenamiento de la red TLRN

El entrenamiento según algoritmos genéticos, basado en 100 generaciones de 50 individuos con optimización genética dio los siguientes resultados:

Como se ve en la Ilustración 61, el error en el mejor de los individuos ha ido disminuyendo conforme han evolucionado las generaciones de individuos hasta que a partir de la generación 3 no hay mejora.

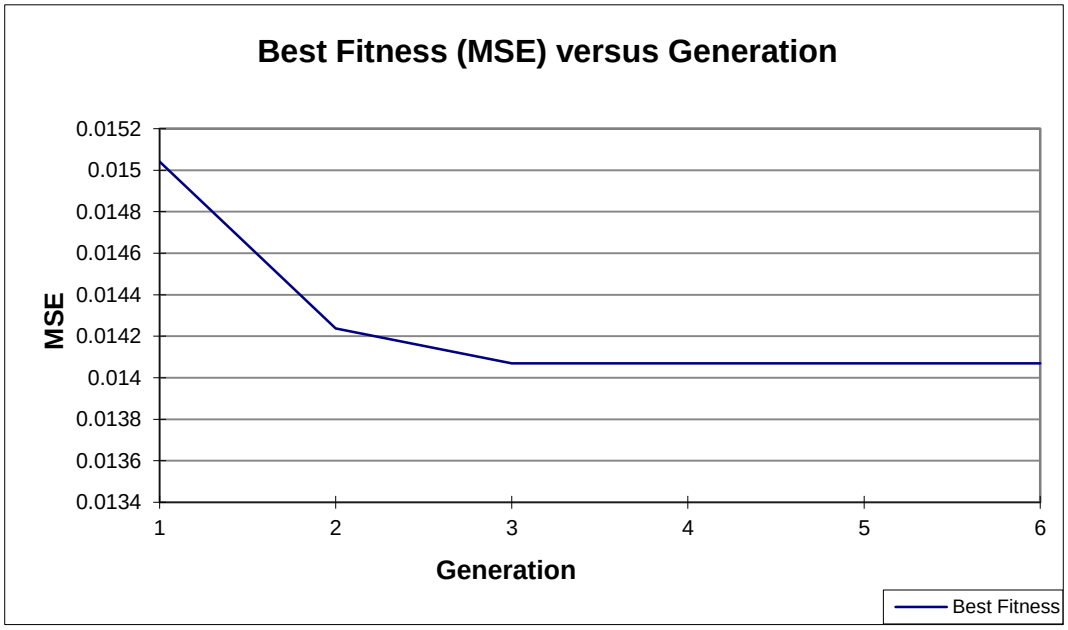


Ilustración 61. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red TLRN.

En la Ilustración 62 se muestra la media de los 50 individuos de la generación donde se aprecia que la primera generación era muy mala pero con operadores de cruce se van concentrando los mejores bajando progresivamente la media.

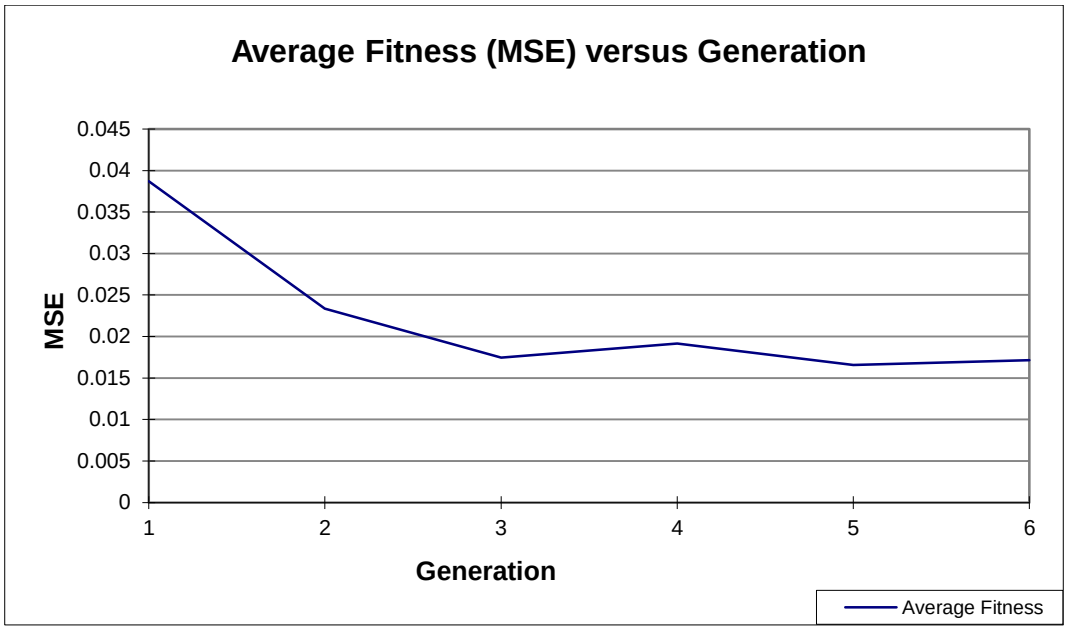


Ilustración 62. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red TLRN.

En la Tabla 22 se resumen los resultados anteriores:

Optimization Summary	*Best Fitness*	*Average Fitness*
Generation #	3	5
Minimum MSE	0.014069565	0.016556231
Final MSE	0.014069565	0.017152624

Tabla 22. Resumen de la optimización genética en la red TLRN.

En la Ilustración 63 se puede ver la comparativa de los datos originales con los que la red neuronal TLRN obtiene tras el ajuste de la misma con los datos de entrenamiento.

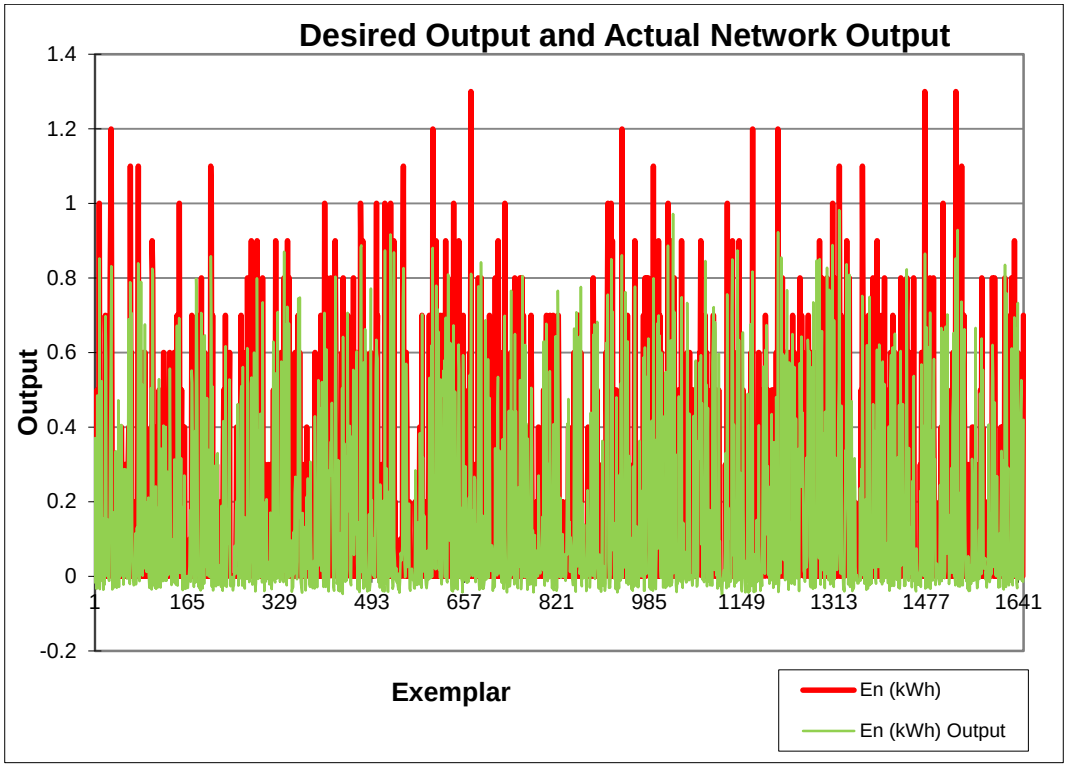


Ilustración 63. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal TLRN.

La Tabla 23 muestra los valores de errores de la red TLRN entrenada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.011361795
NMSE	0.143682263
MAE	0.067982428
Min Abs Error	1.93563E-05
Max Abs Error	0.647891556
r	0.927662649

Tabla 23. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red TLRN al grupo de entrenamiento.

En la Ilustración 64 y en la Tabla 24 aparece el informe de la aplicación de la red neuronal TLRN al grupo de datos de validación cruzada.

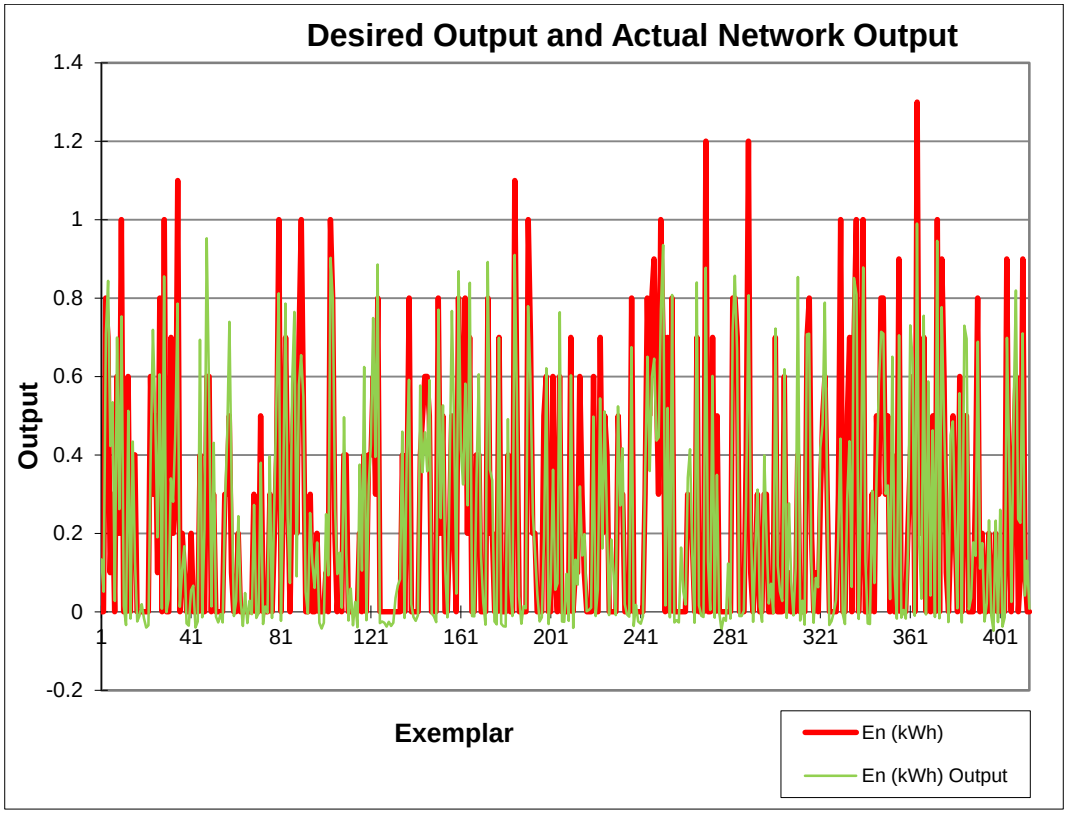


Ilustración 64. Informe gráfico de la aplicación de la red TLRN al grupo de validación cruzada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.014704261
NMSE	0.150805171
MAE	0.084207537
Min Abs Error	3.14442E-05
Max Abs Error	0.558915964
r	0.921719331

Tabla 24. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red TLRN al grupo de validación cruzada.

A continuación, en la Ilustración 65 y en la Tabla 25, se muestra el informe del grupo de datos de test que no ha sido utilizado anteriormente para el entrenamiento de la red neuronal, es decir, la aplicación de la

red neuronal al año sin control (2012) para comprobar el resultado si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

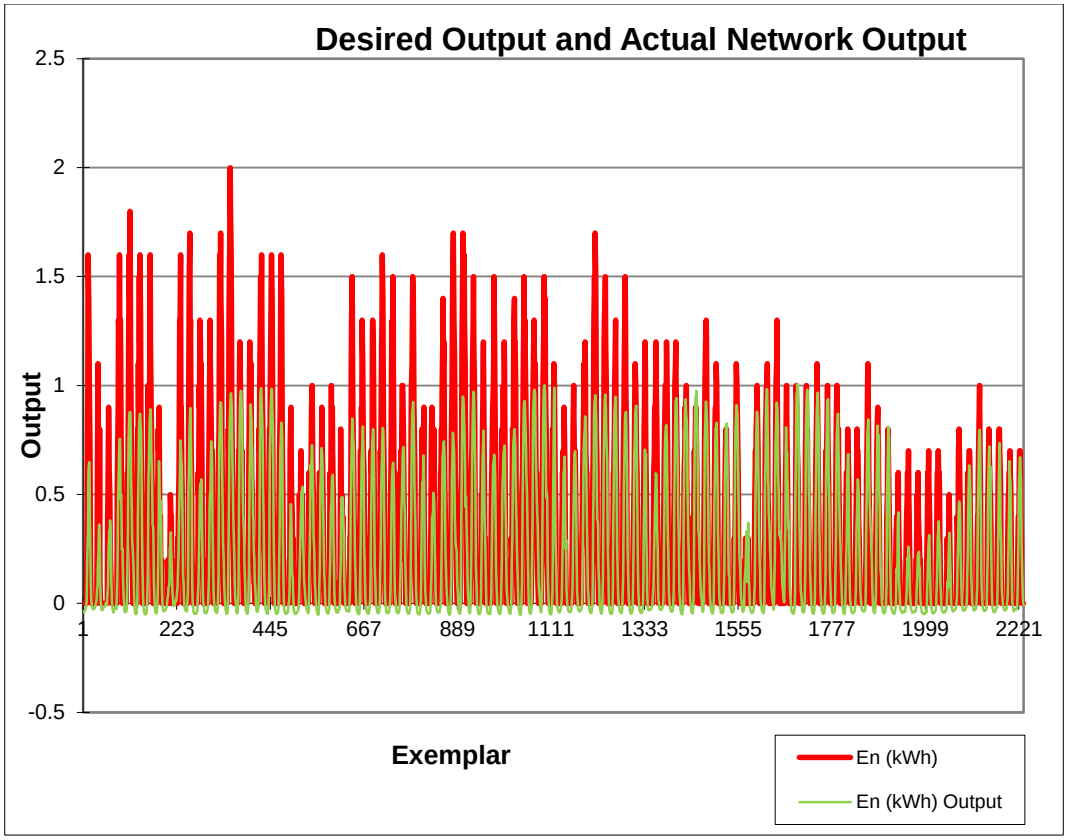


Ilustración 65. Informe gráfico de la aplicación de la red TLRN al grupo de test.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.052383244
NMSE	0.289990818
MAE	0.150695039
Min Abs Error	1.15781E-05
Max Abs Error	1.084716946
r	0.88060782

Tabla 25. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red TLRN al grupo de test.

Se ha realizado también en el software Neurosolutions un estudio de la sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada, esto es, una medida de la influencia que tiene cada una de las entradas en el valor de la salida.

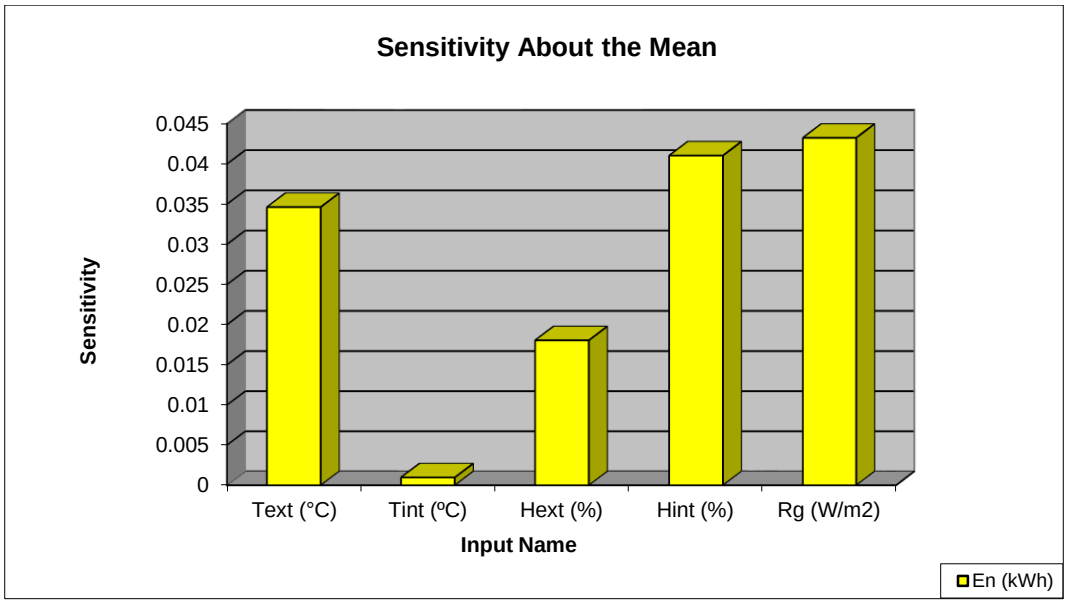


Ilustración 66. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red TLRN.

Sensitivity	*En (kWh)*
Text (°C)	0.034643211
Tint (ºC)	0.000969666
Hext (%)	0.018066204
Hint (%)	0.041054291
Rg (W/m^2)	0.043257916

Tabla 26. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red TLRN.

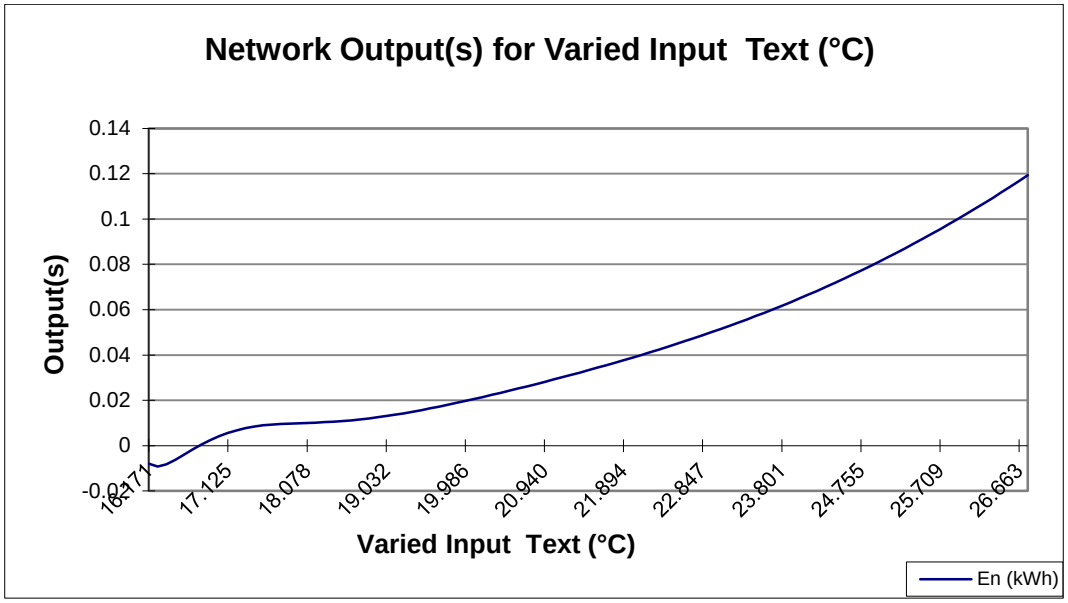


Ilustración 67. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red TLRN.

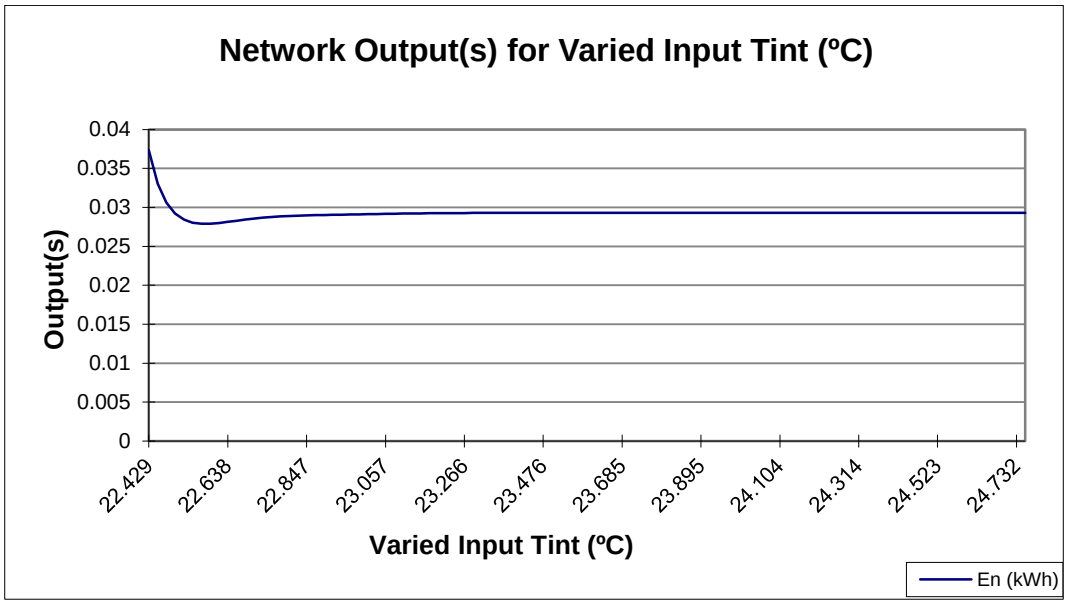


Ilustración 68. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red TLRN.

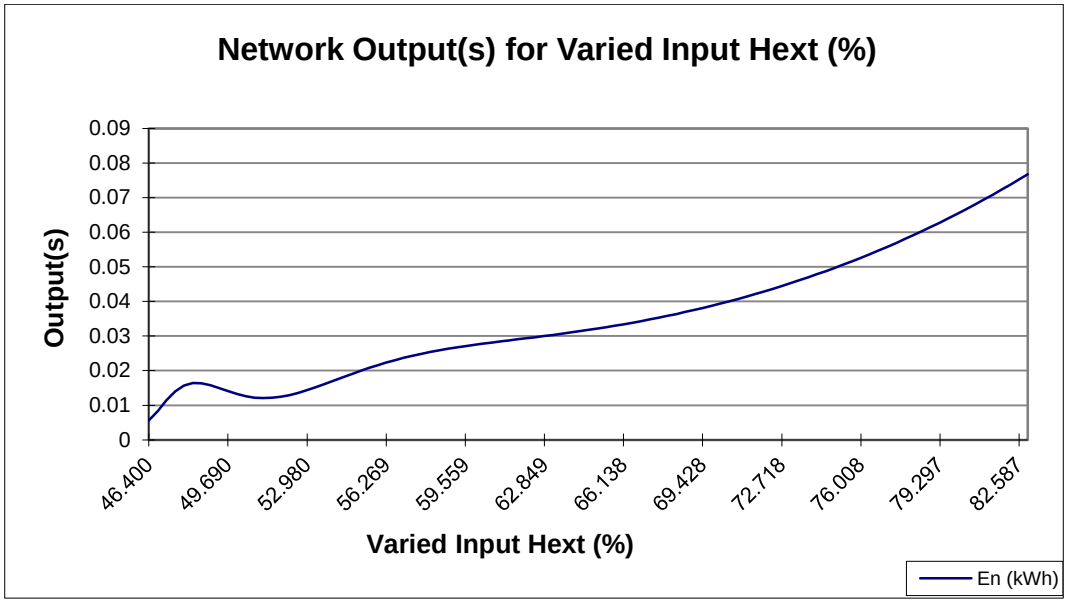


Ilustración 69. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red TLRN.

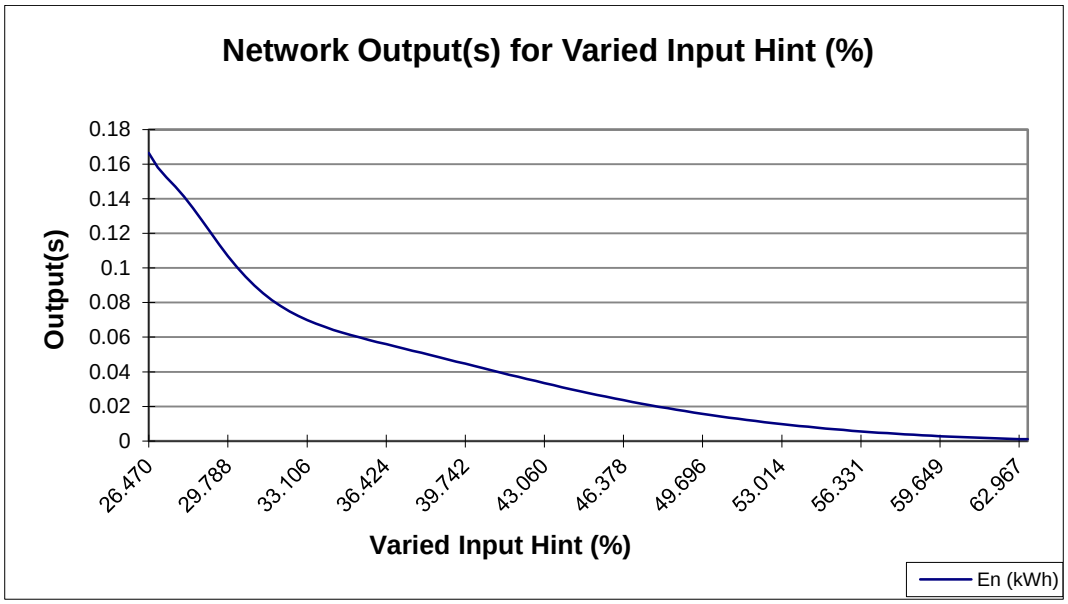


Ilustración 70. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red TLRN.

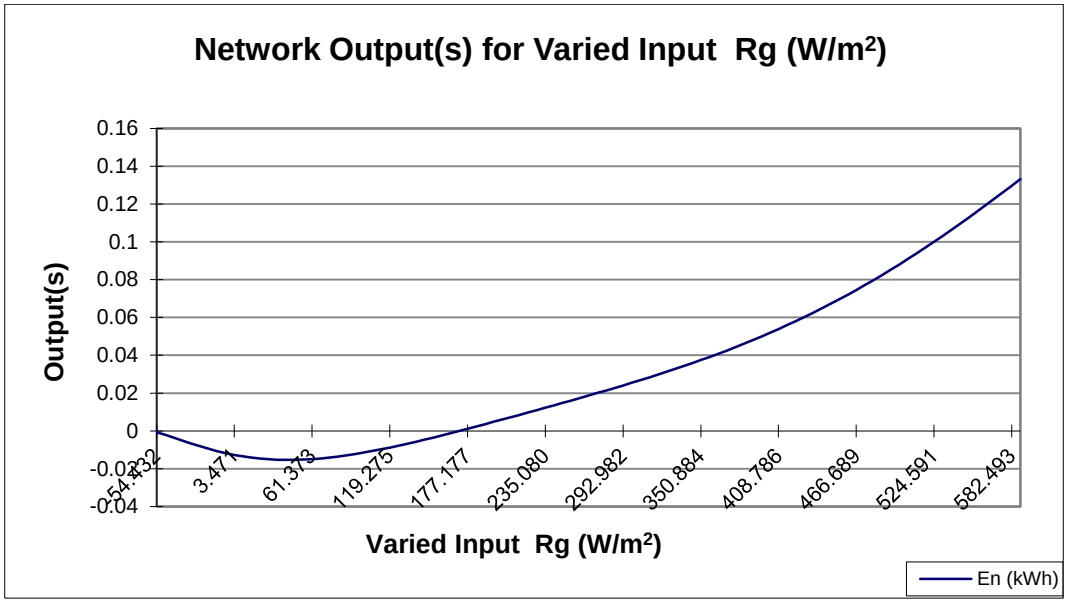


Ilustración 71. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red TLRN.

Se aprecia en el análisis de sensibilidad que la máxima influencia es en la variable Radiación global y la mínima en la Temperatura interior. Con valores intermedios, pero significativos, entre el máximo y el mínimo están la Humedad interior y la Humedad exterior.

6.5.3. Evaluación del error de la red TLRN

Según el procedimiento de selección de una red en función del error calculamos el error de la presente según la Ecuación 1 con resultado mostrado en la Ecuación 5:

$$error_{TLRN} = 0.25 \cdot 0.011361795 + 0.75 \cdot 0.014704261 = \ 0.0138686445$$

Ecuación 5. Error ponderado de la red TLRN.

6.5.4. Aplicación de la red TLRN al año sin control

Esta red TLRN entrenada modela el comportamiento del sistema de control utilizado en la instalación domótica. A partir de los datos del año

2012, año sin control, se aplica la red neuronal para comprobar cuál hubiera sido el consumo energético si se hubiese empleado el sistema de control de persianas en ese año.

El resultado del test de la red neuronal, que modela el comportamiento del sistema de control, sobre el año 2012 queda representado en la Ilustración 72 donde se muestran los datos originales de ese año junto con los datos obtenidos por la red neuronal TLRN que reflejan el comportamiento del sistema si hubiese existido el control.

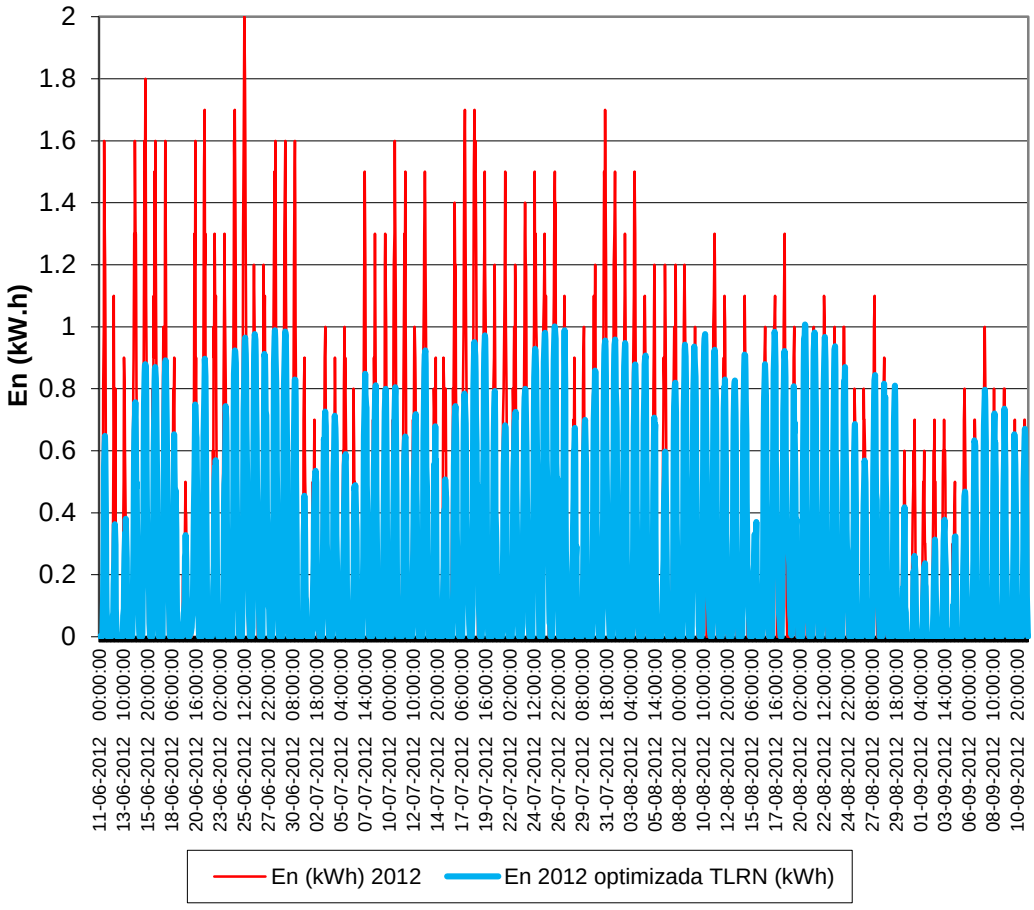


Ilustración 72. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal TLRN simulando el control sobre el sistema.

En cuanto a los valores totales de energía consumida por el equipo de aire acondicionado en el periodo sin control (año 2012) fueron los siguientes:

- Año 2012 sin control: 738.5 kWh
- Año 2012 con control (red neuronal TLRN): 533.0 kWh

Tomando el año 2012, la diferencia entre el consumo sin control y el consumo que habría habido utilizando el control se obtiene una diferencia de 738.5 –533.0 = 205.5 kWh que en porcentaje supone un **ahorro del 27.8%**. Esto muestra la eficacia de la propuesta de control.

6.6. Entrenamiento de red MNN

Se crea una red neuronal MNN (Modular Neural Network) que es una clase especial de red MLP. Este tipo de red procesa las entradas en paralelo utilizando varias redes MLP para luego combinar sus resultados. Esto tiende a crear una estructura dentro de la topología, que promoverá la especialización de la función en cada sub-módulo. (Auda & Kamel, 1998).

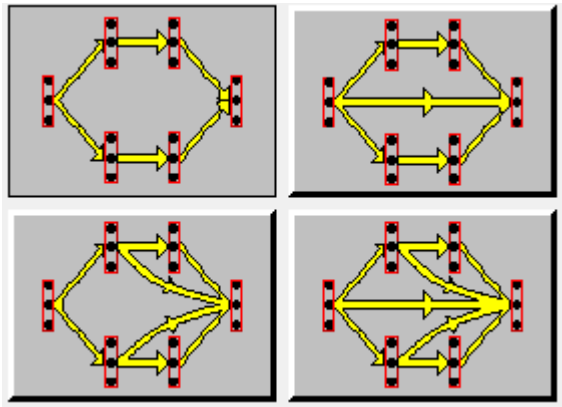


Ilustración 73. Arquitecturas de redes MNN.

En contraste con las redes MLP, las redes MNN no tienen plena interconectividad entre sus capas. Por lo tanto, se requiere un número más reducido de pesos para el mismo tamaño de red (es decir, el mismo

número de elementos de procesado). Esto tiende a acelerar los tiempos de formación y reducir el número de individuos de entrenamiento requeridos. Hay muchas maneras de segmentar una red MLP en módulos. No está claro cómo diseñar mejor la topología modular basada en los datos. No hay garantías de que cada módulo está especializando su formación en una parte única los datos.

6.6.1. Configuración de la red MNN

Los parámetros de configuración de la red neuronal introducidos en el software Neurosolutions para comparar los resultados y comprobar el incremento en el ahorro energético han sido los siguientes:

- Tipo de red: *Modular Neural Network*
- Configuración general de la red:
    - *Input PEs: 5*
    - *Output PEs: 1*
    - *Exemplars: 1698*
    - *Hidden Layers: 2*
- Configuración de la capa oculta 1:
    - *Upper PEs: 14*
    - *Genetic Algorithm*
    - *Upper Transfer: TanhAxon*
    - *Lower PEs: 14*
    - *Genetic Algorithm*
    - *Lower Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa oculta 2:

- *Upper PEs: 7*
- *Genetic Algorithm*
- *Upper Transfer: TanhAxon*
- *Lower PEs: 7*
- *Genetic Algorithm*
- *Lower Transfer: TanhAxon*
- *Learning rule: Momentum*
  - *Step size: 0.01*
  - *Momentum: 0.7*

- Configuración de la capa de salida:
  - *Genetic Algorithm*
  - *Transfer: TanhAxon*
  - *Learning rule: Momentum*
    - *Step size: 0.01*
    - *Momentum: 0.7*
- Control de aprendizaje supervisado:
  - *Maximum Epochs: 1000*
  - *Termination: MSE, Cross Val. Set, Increase*
  - *Weight Update: Batch*

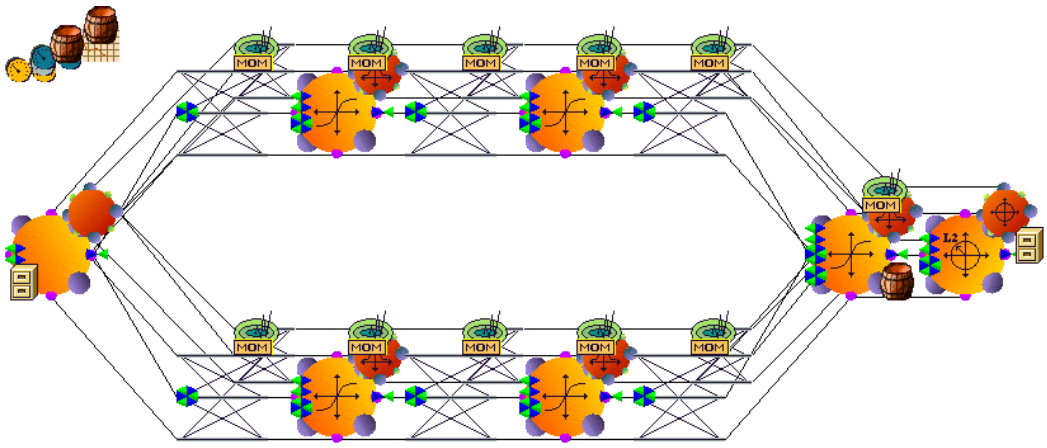


Ilustración 74. Red neuronal con topología MNN.

Los datos para el entrenamiento de la red se tomaron de los del intervalo indicado anteriormente del año 2013, año con control, y se organizaron de la siguiente manera:

- Datos de entrada:
  - Temperatura interior
  - Temperatura exterior
  - Humedad relativa interior
  - Humedad relativa exterior
  - Radiación global acumulada
- Datos deseados (salida):
  - Energía eléctrica consumida

En cuanto al volumen de datos por hora se distribuyen un 80% para el entrenamiento de la red y el 20% restante para validación cruzada tras reordenarlos aleatoriamente.

6.6.2. Informes del entrenamiento de la red MNN

El entrenamiento según algoritmos genéticos, basado en 100 generaciones de 20 individuos con optimización genética dio los siguientes resultados:

Como se ve en la Ilustración 75, el error en el mejor de los individuos ha ido disminuyendo conforme han evolucionado las generaciones de individuos hasta que a partir de la generación 8 no hay mejora.

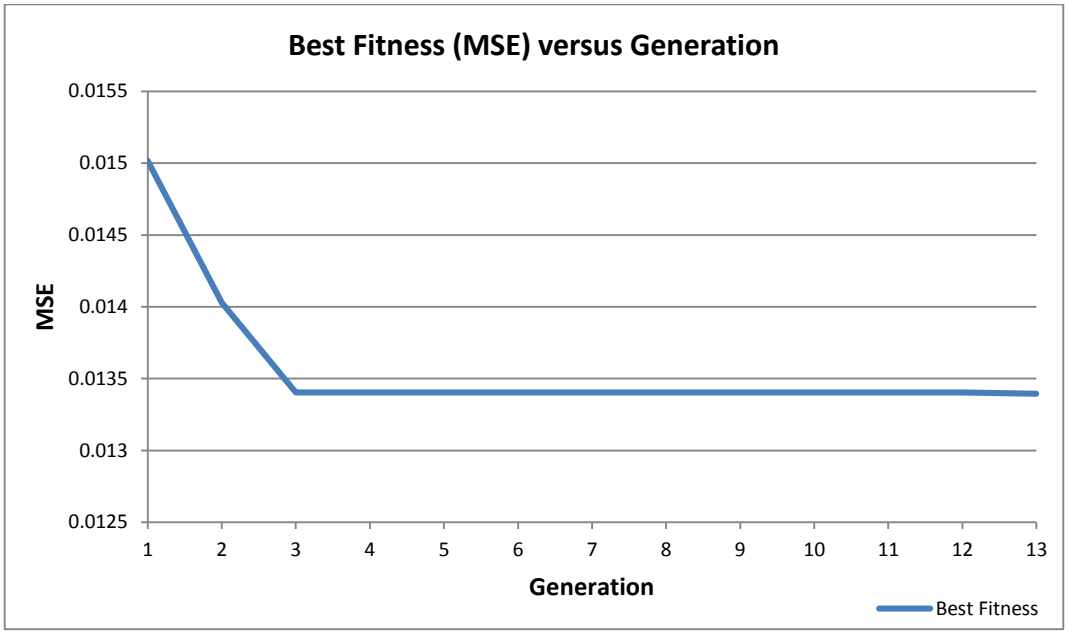


Ilustración 75. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red MNN.

En la Ilustración 76 se muestra la media de los 13 individuos de la generación donde se aprecia que la primera generación era muy mala pero con operadores de cruce se van concentrando los mejores bajando progresivamente la media.

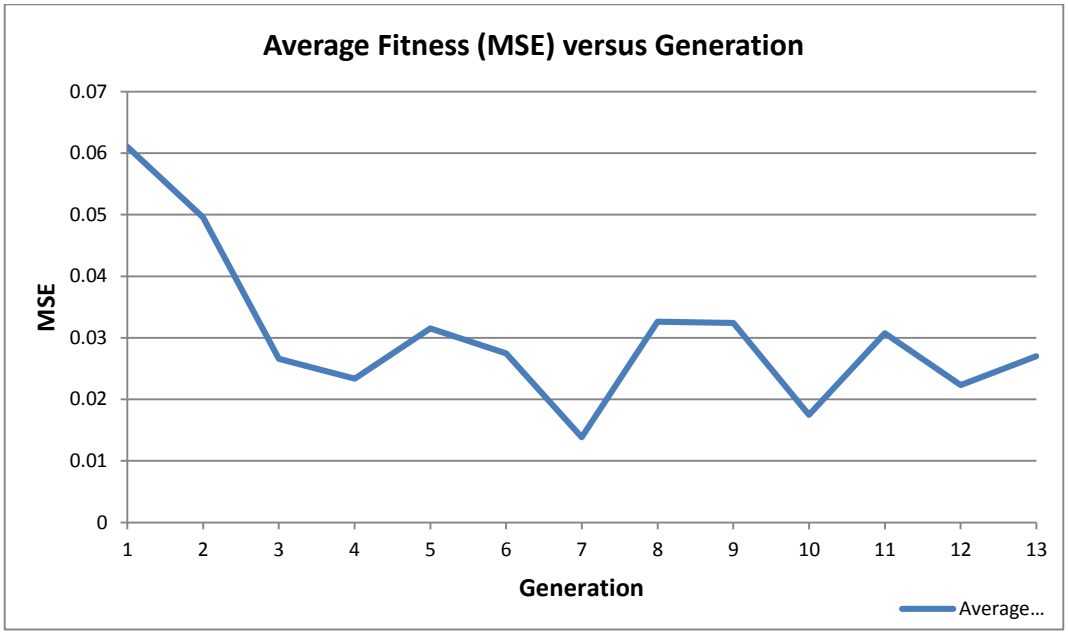


Ilustración 76. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red MNN.

En la Tabla 27 se resumen los resultados anteriores:

Optimization Summary	*Best Fitness*	*Average Fitness*
Generation #	13	7
Minimum MSE	0.01339395	0.01382647
Final MSE	0.01339395	0.027020684

Tabla 27. Resumen de la optimización genética en la red MNN.

En la Ilustración 77 se puede ver la comparativa de los datos originales con los que la red neuronal MNN obtiene tras el ajuste de la misma con los datos de entrenamiento.

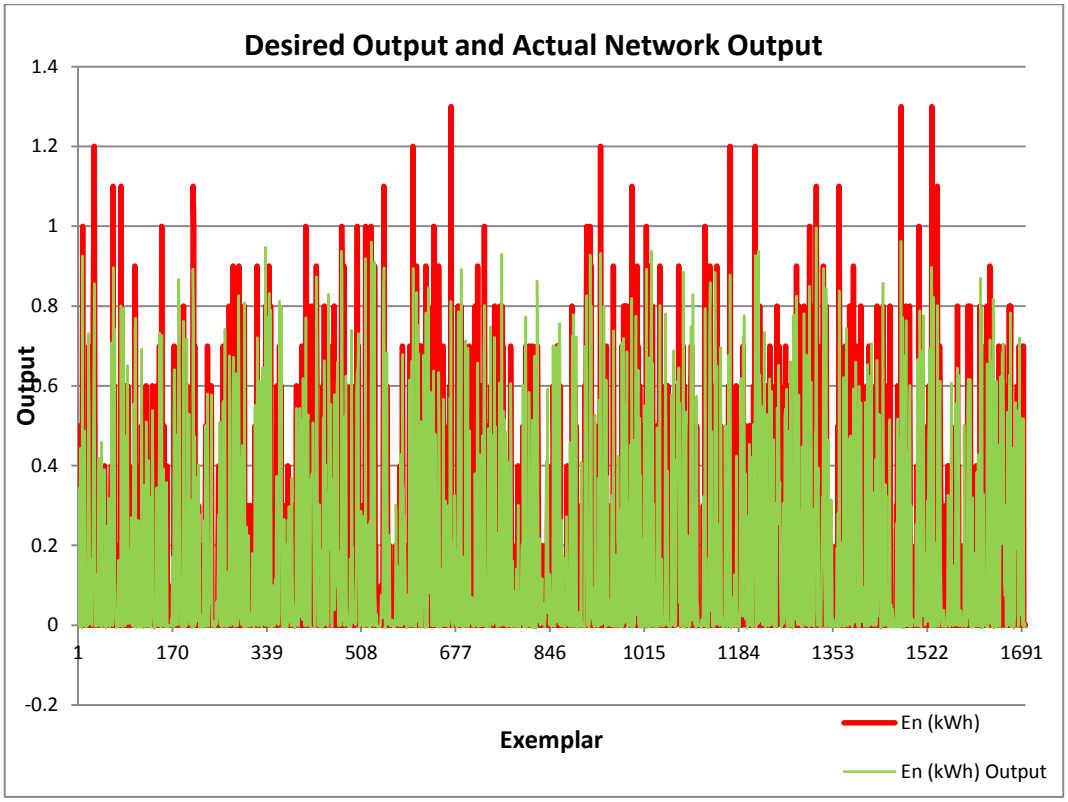


Ilustración 77. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal MNN.

La Tabla 28 muestra los valores de errores de la red MNN entrenada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.010685482
NMSE	0.135157488
MAE	0.059916235
Min Abs Error	5.46778E-06
Max Abs Error	0.596406705
r	0.929971358

Tabla 28. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MNN al grupo de entrenamiento.

En la Ilustración 78 y en la Tabla 29 aparece el informe de la aplicación de la red neuronal MNN al grupo de datos de validación cruzada.

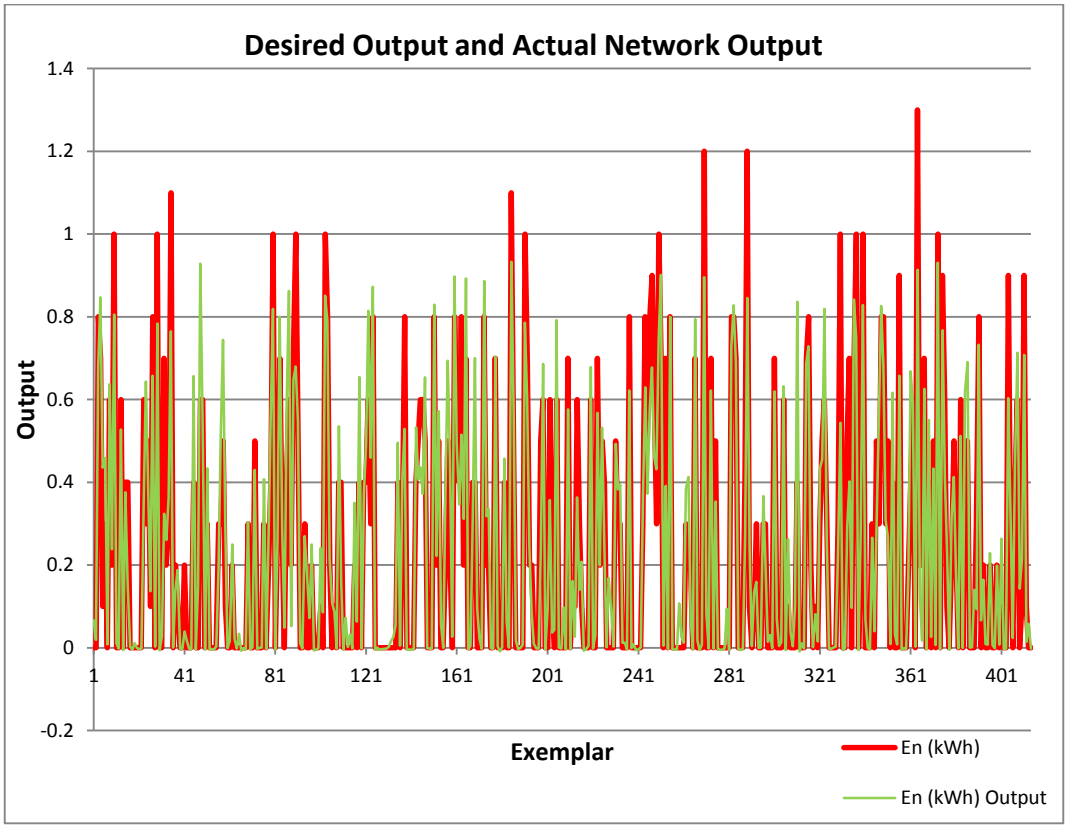


Ilustración 78. Informe gráfico de la aplicación de la red MNN al grupo de validación cruzada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.013972701
NMSE	0.143302375
MAE	0.075523032
Min Abs Error	8.90003E-05
Max Abs Error	0.456209197
r	0.92560764

Tabla 29. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MNN al grupo de validación cruzada.

A continuación, en la Ilustración 79 y en la Tabla 30, se muestra el informe del grupo de datos de test que no ha sido utilizado anteriormente para el entrenamiento de la red neuronal, es decir, la aplicación de la red neuronal al año sin control (2012) para comprobar el resultado si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

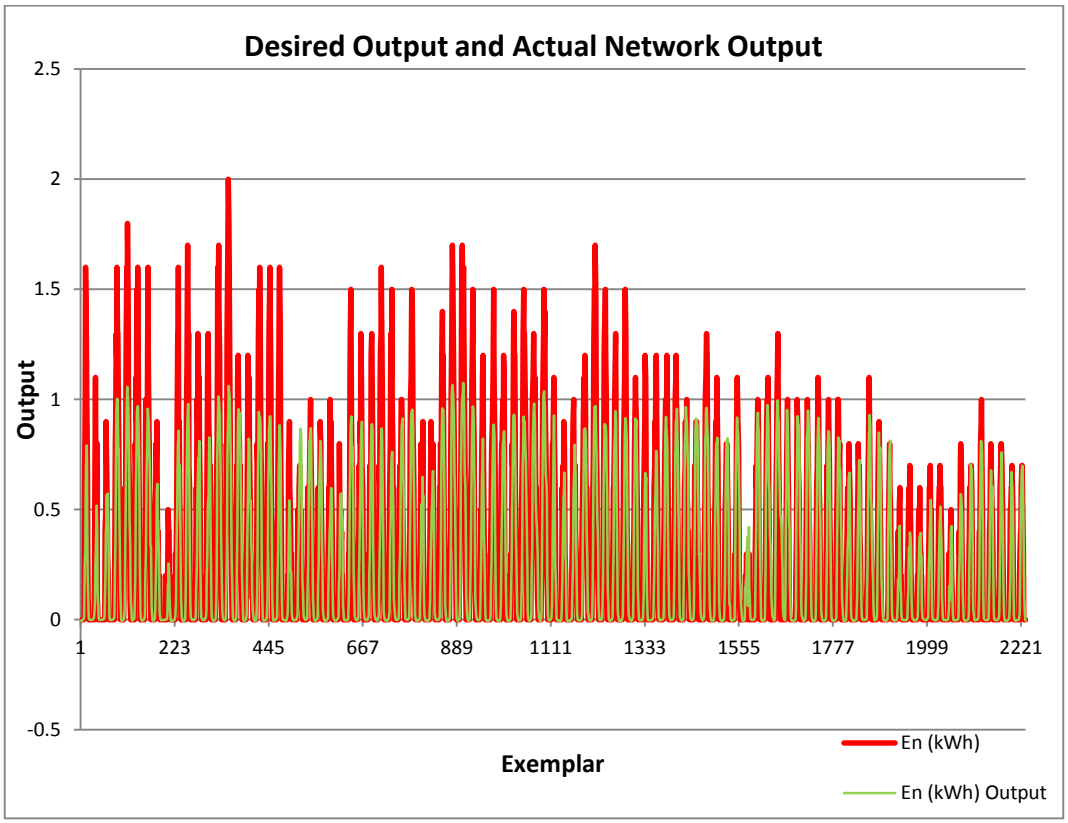


Ilustración 79. Informe gráfico de la aplicación de la red MNN al grupo de test.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.042066774
NMSE	0.232879395
MAE	0.124310039
Min Abs Error	3.9177E-06
Max Abs Error	1.021404669
r	0.897365164

Tabla 30. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red MNN al grupo de test.

El estudio de sensibilidad de la variable de salida frente a las variables de entrada dio los siguientes resultados:

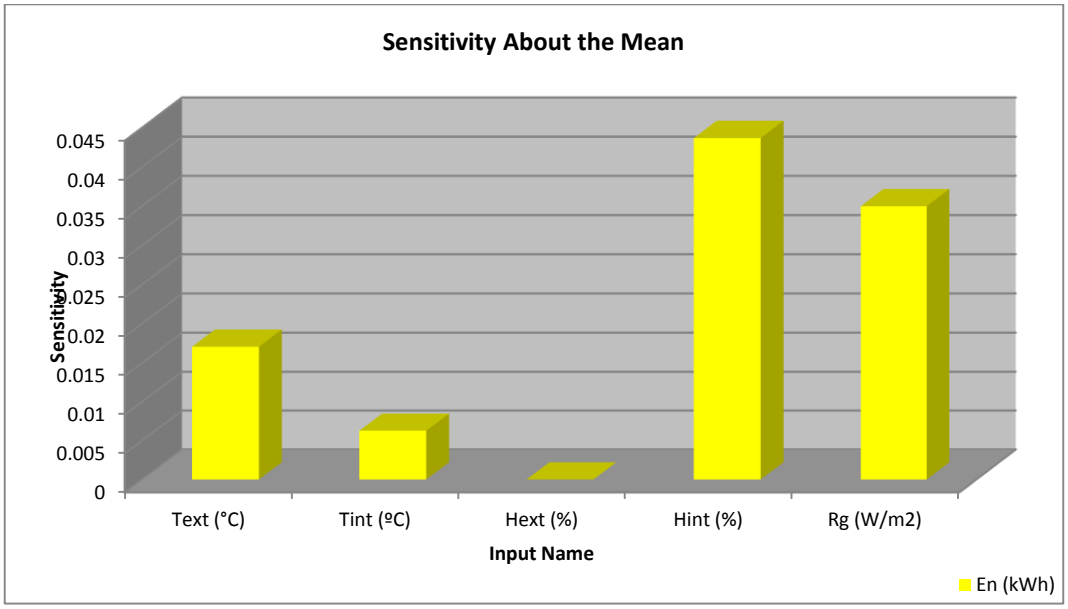


Ilustración 80. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red MNN.

Sensitivity	*En (kWh)*
Text (°C)	0.017062844
Tint (ºC)	0.006274729
Hext (%)	2.7894E-17
Hint (%)	0.043687506
Rg (W/m^2)	0.034983125

Tabla 31. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red MNN.

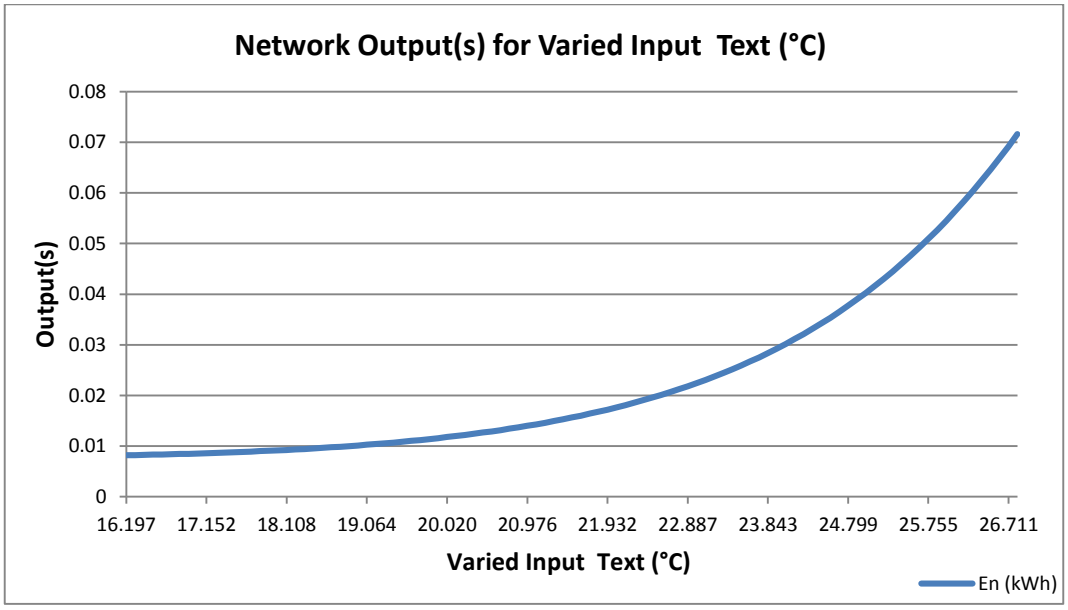


Ilustración 81. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red MNN.

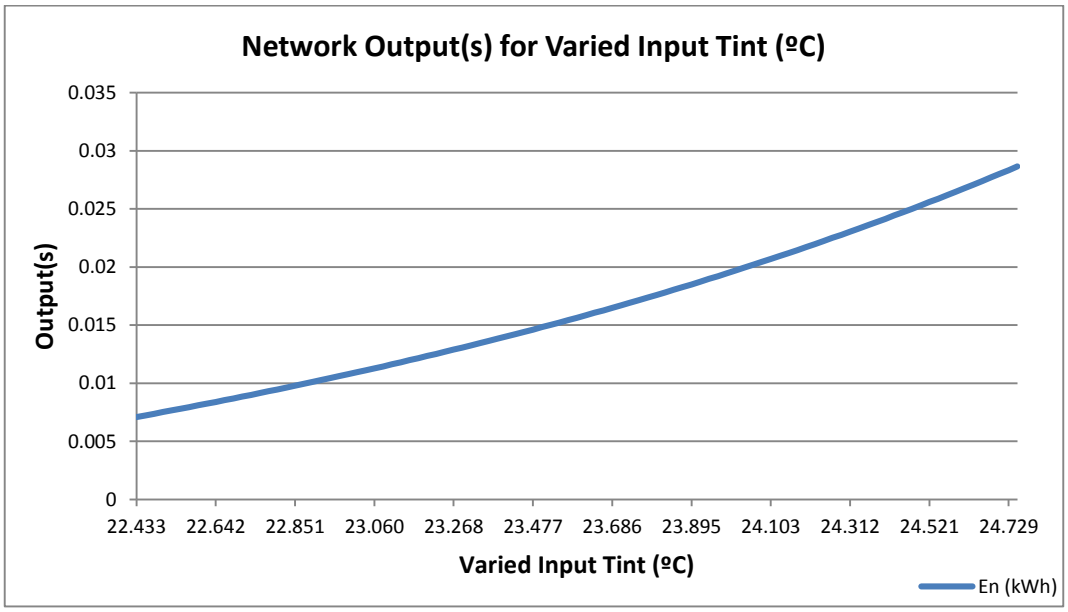


Ilustración 82 Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red MNN.

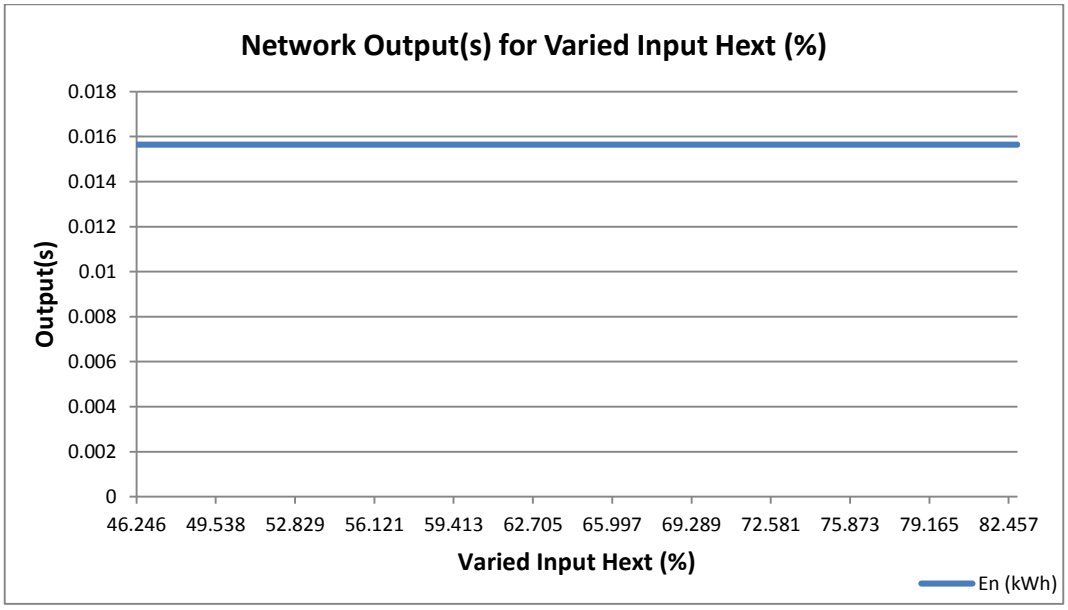


Ilustración 83. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red MNN.

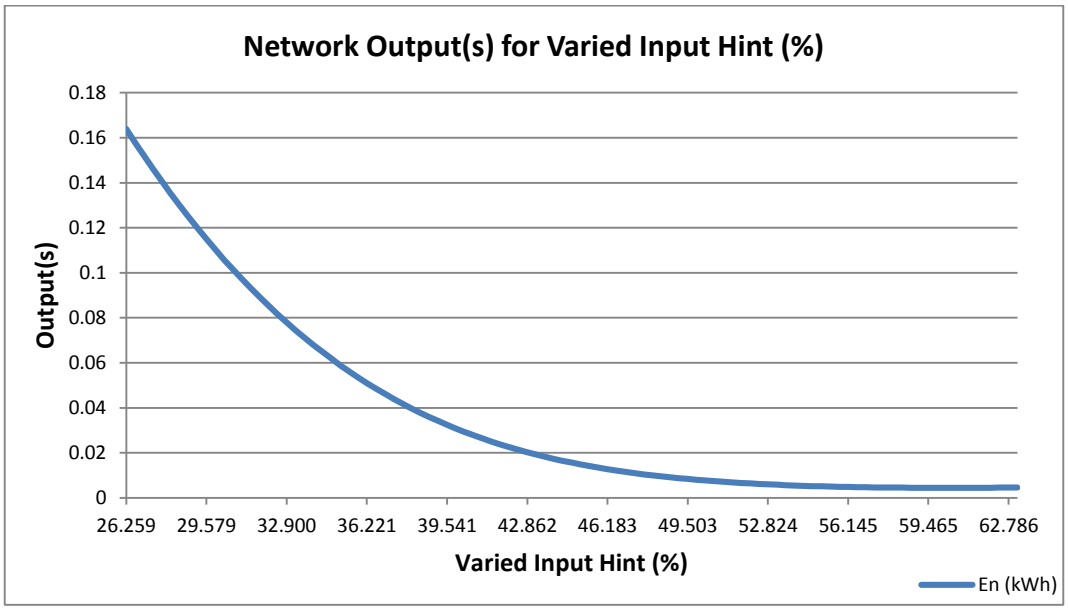


Ilustración 84. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red MNN.

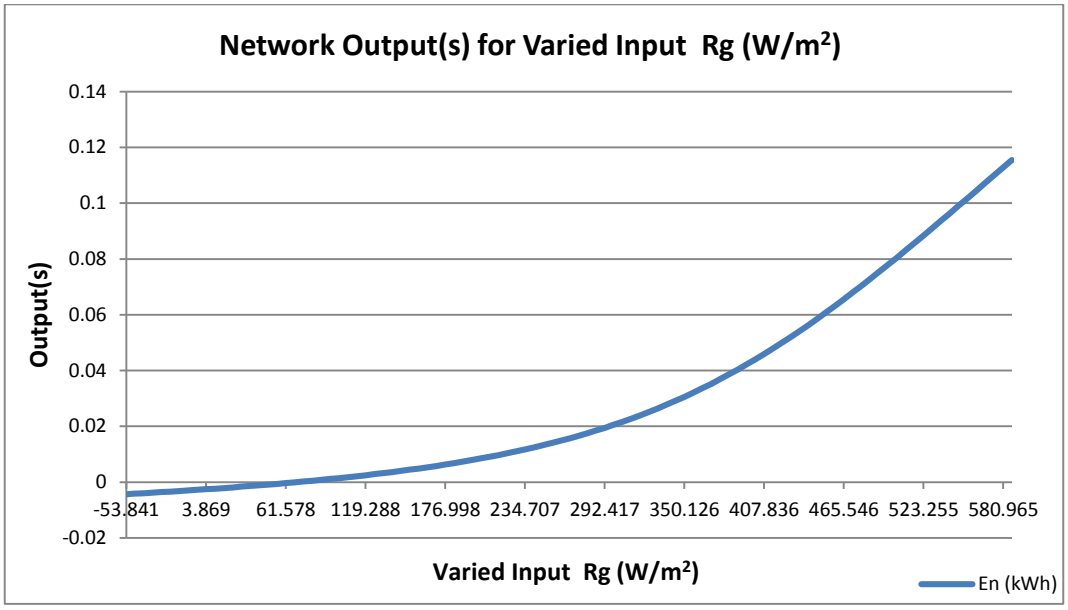


Ilustración 85. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red MNN.

Se aprecia en el análisis de sensibilidad que la máxima influencia es en la variable Humedad interior seguida de la Radiación global y la mínima en la Humedad exterior y Temperatura interior.

6.6.3. Evaluación del error de la red MNN

Según el procedimiento de selección de una red en función del error calculamos el error de la presente según la Ecuación 1 mostrando el resultado en la Ecuación 6:

$$error_{MNN} = 0.25 \cdot 0.010685482 + 0.75 \cdot 0.013972701 = 0.01047952575$$

Ecuación 6. Error ponderado de la red MNN.

6.6.4. Aplicación de la red MNN al año sin control

La red MNN entrenada modela el comportamiento del sistema de control utilizado en la instalación domótica. Tomando los datos del año sin control, el 2012, al aplicar esta red comprobamos el efecto que

hubiera tenido el sistema de control si se hubiera implementado en ese año.

El resultado del test de la red neuronal, que modela el comportamiento del sistema de control, sobre el año 2012 queda representado en la Ilustración 86 donde se muestran los datos originales de ese año junto con los datos obtenidos por la red neuronal MNN que reflejan el comportamiento del sistema si hubiese existido el control.

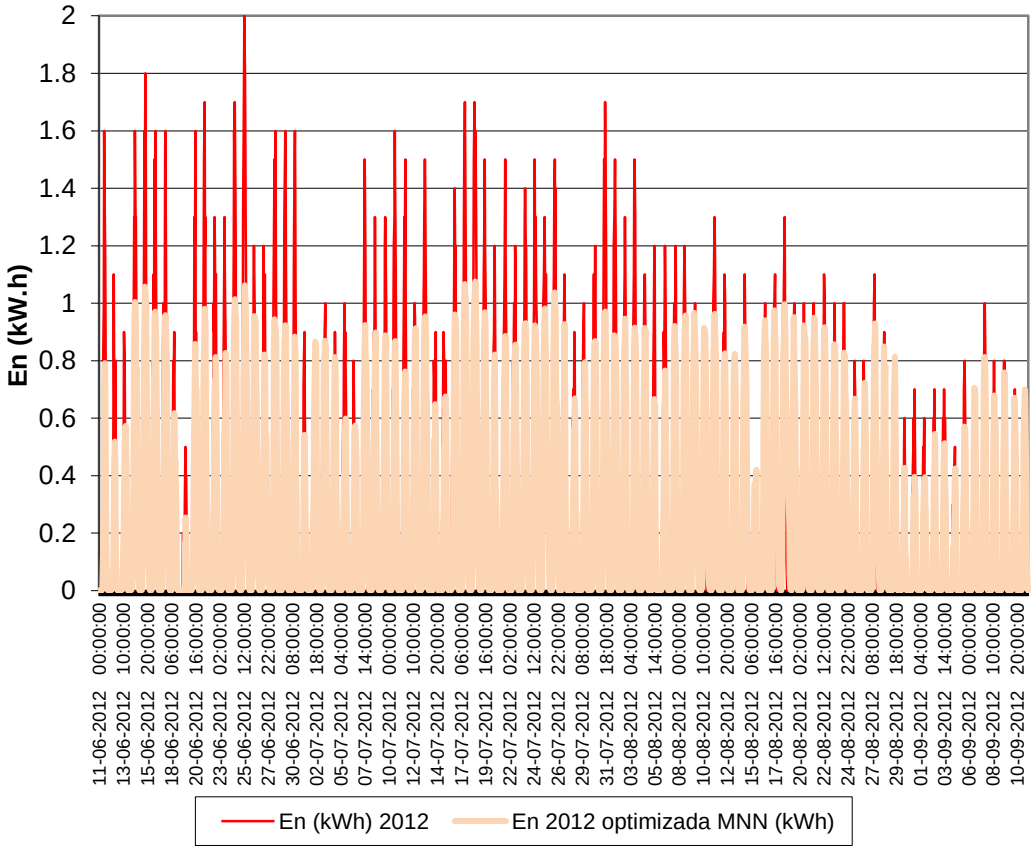


Ilustración 86. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal MNN simulando el control sobre el sistema.

En cuanto a los valores totales de energía consumida por el equipo de aire acondicionado en el periodo sin control (año 2012) fueron los siguientes:

- Año 2012 sin control: 738.5 kWh

- Año 2012 con control (red neuronal MNN): 596.7 kWh

Tomando el año 2012, la diferencia entre el consumo sin control y el consumo que habría habido utilizando el control se obtiene una diferencia de 738.5 – 596.7 = 141.8 kWh que en porcentaje supone un **ahorro del 19.2%**. Esto muestra la eficacia de la propuesta de control.

6.7. Entrenamiento de red PCA

Las redes neuronales PCA (Principal Component Analysis) permiten la transformación de los datos en un espacio de muchas dimensiones a otro espacio de menor dimensión (Karhunen & Joutsensalo, 1995), (Dong & McAvoy, 1996), (Kulkarni, Chaudhary, Nandi, Tambe, & Kulkarni, 2004).

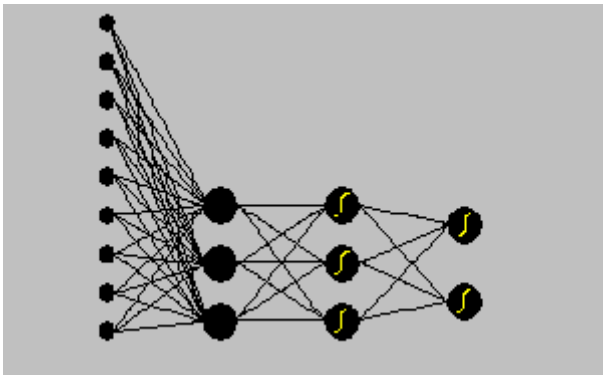


Ilustración 87. Arquitectura de una red PCA.

Las redes PCA combinan el aprendizaje supervisado y sin supervisión en la misma topología. La red PCA es un procedimiento lineal sin supervisión que encuentra un conjunto de características sin correlación, las componentes principales, a partir de la entrada. Se utiliza una red MLP para realizar la clasificación no lineal de estas componentes.

PCA es un método de reducción de datos, que condensa los datos de entrada en unos pocos componentes principales. Como con cualquier método de reducción de datos, existe la posibilidad de perder información de entrada importante. El número de componentes principales seleccionados será un compromiso entre la eficiencia del entrenamiento

(pocos componentes PCA) y la exactitud de los resultados (un gran número de componentes PCA). No es posible proporcionar una fórmula general para la selección de un número apropiado de componentes principales para una aplicación dada.

Ambas opciones de reglas de aprendizaje son implementaciones normalizadas de la regla de aprendizaje de Hebb. La regla de aprendizaje de Hebb debe ser utilizada con cuidado, ya que puede llegar a ser inestable si las entradas no están normalizadas adecuadamente. Las dos opciones más sólidas son las implementaciones de Oja y Sanger del principio de Hebb. Entre los dos, Sanger se prefiere para PCA, ya que ordena de forma natural los componentes de la red PCA por magnitud.

6.7.1. Configuración de la red PCA

Los parámetros de configuración de la red neuronal introducidos en el software Neurosolutions para comparar los resultados y comprobar el incremento en el ahorro energético han sido los siguientes:

- Tipo de red: *Principal Component Analysis*
- Configuración general de la red:
    - *Input PEs: 5*
    - *Output PEs: 1*
    - *Exemplars: 1698*
    - *Hidden Layers: 1*
    - *Principal Components: 4*
    - *Genetic Algoritm*
    - *Learning Rule: SangersFull*
- Configuración de la capa oculta 1:
    - *Processing Elements: 28*
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*

- *Learning rule: Momentum*
  - *Step size: 0.01*
  - *Momentum: 0.7*

- Configuración de la capa de salida:
  - *Transfer: TanhAxon*
  - *Learning rule: Momentum*
    - *Step size: 0.01*
    - *Momentum: 0.7*

- Control de aprendizaje no supervisado:
  - *Maximum Epochs: 100*
  - *Learning rate Start at: 0.01*
  - *Learning rate Decay to: 0.001*

- Control de aprendizaje supervisado:
  - *Maximum Epochs: 1000*
  - *Termination: MSE, Cross Val. Set, Increase*
  - *Weight Update: Batch*

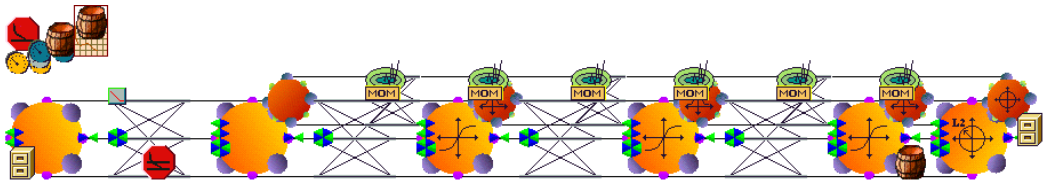


Ilustración 88. Red neuronal con arquitectura PCA.

Los datos para el entrenamiento de la red se tomaron de los del intervalo indicado anteriormente del año 2013, año con control, y se organizaron de la siguiente manera:

- Datos de entrada:

  - Temperatura interior
  - Temperatura exterior
  - Humedad relativa interior
  - Humedad relativa exterior
  - Radiación global acumulada
- Datos deseados (salida):
  - Energía eléctrica consumida

En cuanto al volumen de datos por hora se distribuyen un 80% para el entrenamiento de la red y el 20% restante para validación cruzada tras reordenarlos aleatoriamente.

6.7.2. Informes del entrenamiento de la red PCA

El entrenamiento según algoritmos genéticos, basado en 100 generaciones de 20 individuos con optimización genética dio los siguientes resultados:

Como se ve en la Ilustración 89, el error en el mejor de los individuos ha ido disminuyendo conforme han evolucionado las generaciones de individuos hasta la generación 18.

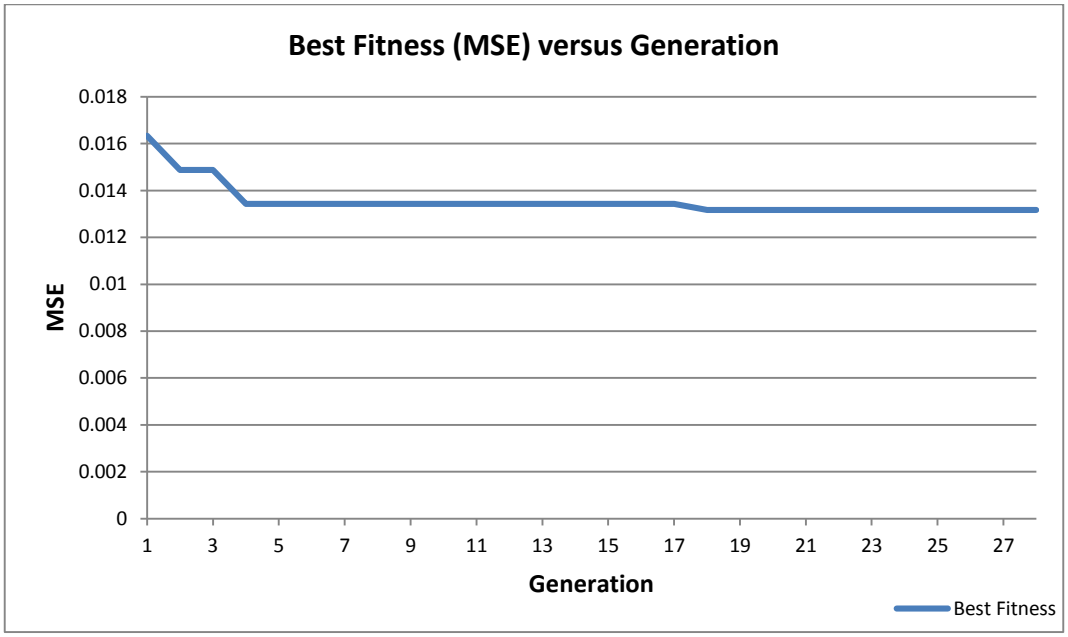


Ilustración 89. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red PCA.

En Ilustración 90 se muestra la media de los 26 individuos de la generación donde se aprecia que la primera generación era muy mala pero con operadores de cruce se van concentrando los mejores bajando progresivamente la media.

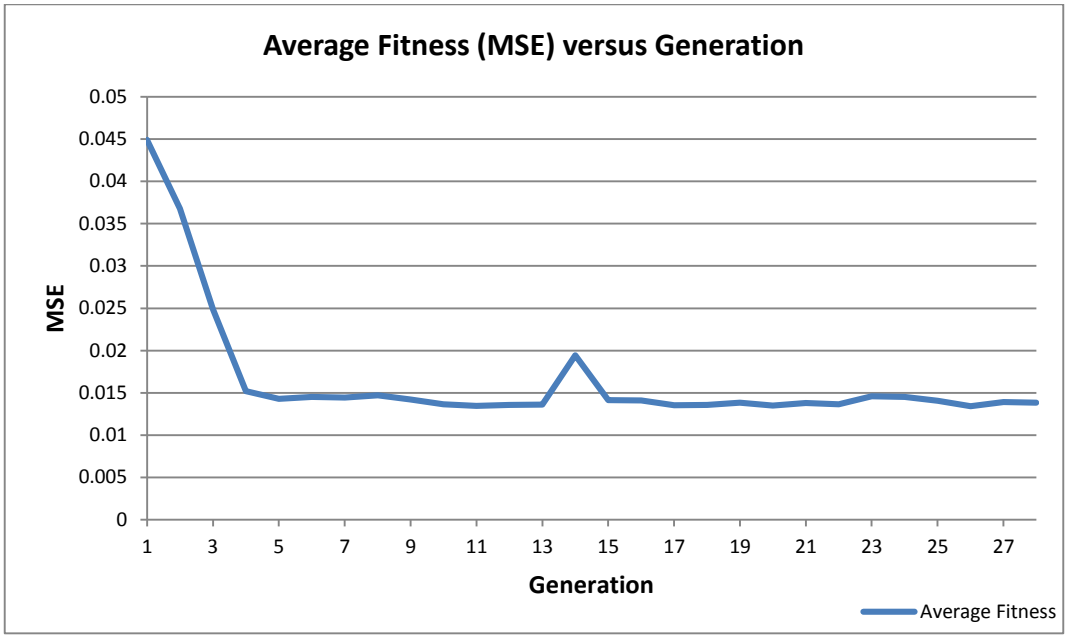


Ilustración 90. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red PCA.

En la Tabla 32 se resumen los resultados anteriores:

Optimization Summary	*Best Fitness*	*Average Fitness*
Generation #	18	26
Minimum MSE	0.013170459	0.013403002
Final MSE	0.013170459	0.01382321

Tabla 32. Resumen de la optimización genética en la red PCA.

En la Ilustración 91 se puede ver la comparativa de los datos originales con los que la red neuronal PCA obtiene tras el ajuste de la misma con los datos de entrenamiento.

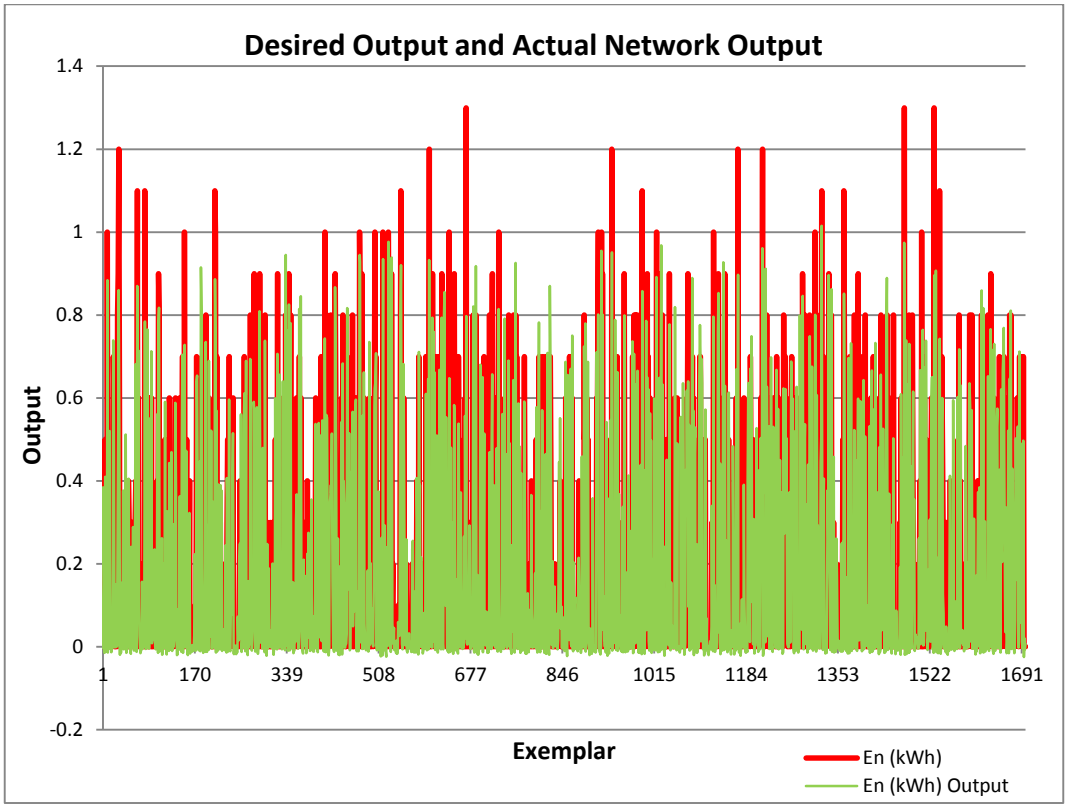


Ilustración 91. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal PCA.

La Tabla 33 muestra los valores de errores de la red PCA entrenada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.010619569
NMSE	0.134323766
MAE	0.06245833
Min Abs Error	1.08919E-06
Max Abs Error	0.627737747
r	0.930420793

Tabla 33. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red PCA al grupo de entrenamiento.

En la Ilustración 92 y en la Tabla 34 aparece el informe de la aplicación de la red neuronal PCA al grupo de datos de validación cruzada.

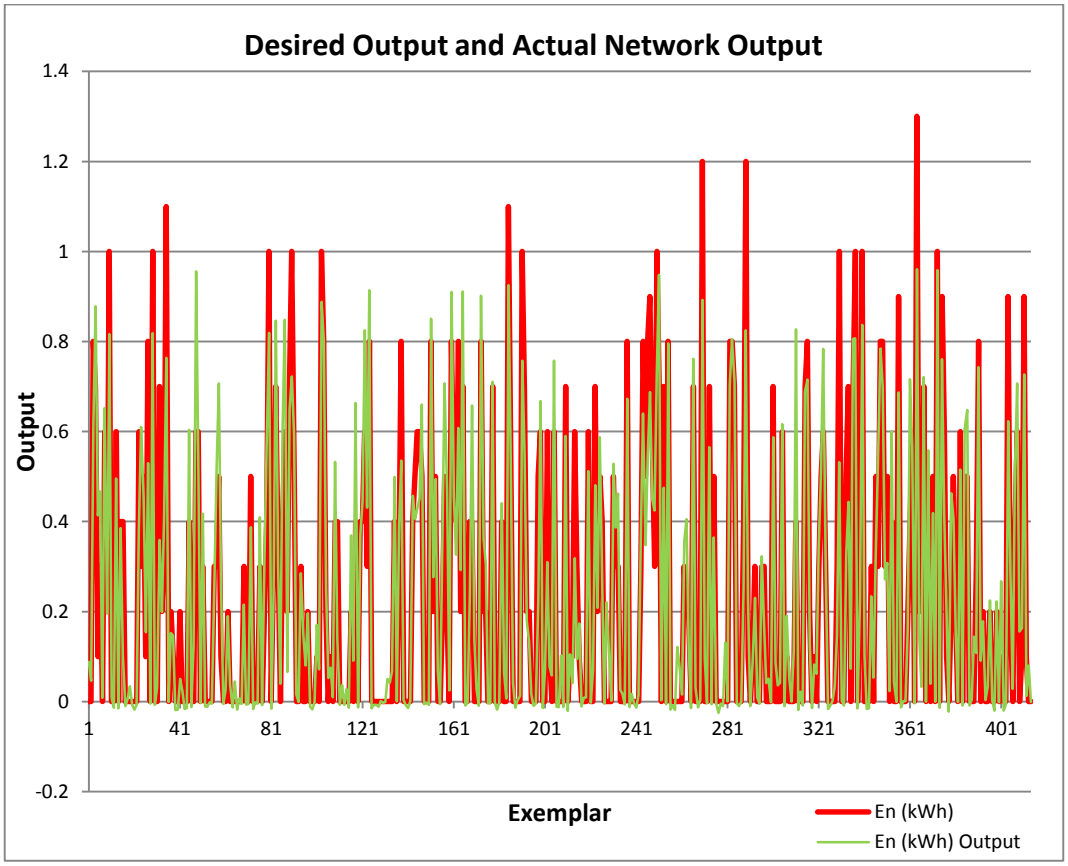


Ilustración 92. Informe gráfico de la aplicación de la red PCA al grupo de validación cruzada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.013739553
NMSE	0.140911242
MAE	0.077319044
Min Abs Error	1.76096E-05
Max Abs Error	0.467857777
r	0.926886739

Tabla 34. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red PCA al grupo de validación cruzada.

A continuación, en la Ilustración 93 y en la Tabla 35, se muestra el informe del grupo de datos de test que no ha sido utilizado anteriormente para el entrenamiento de la red neuronal, es decir, la aplicación de la red neuronal al año sin control (2012) para comprobar el resultado si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

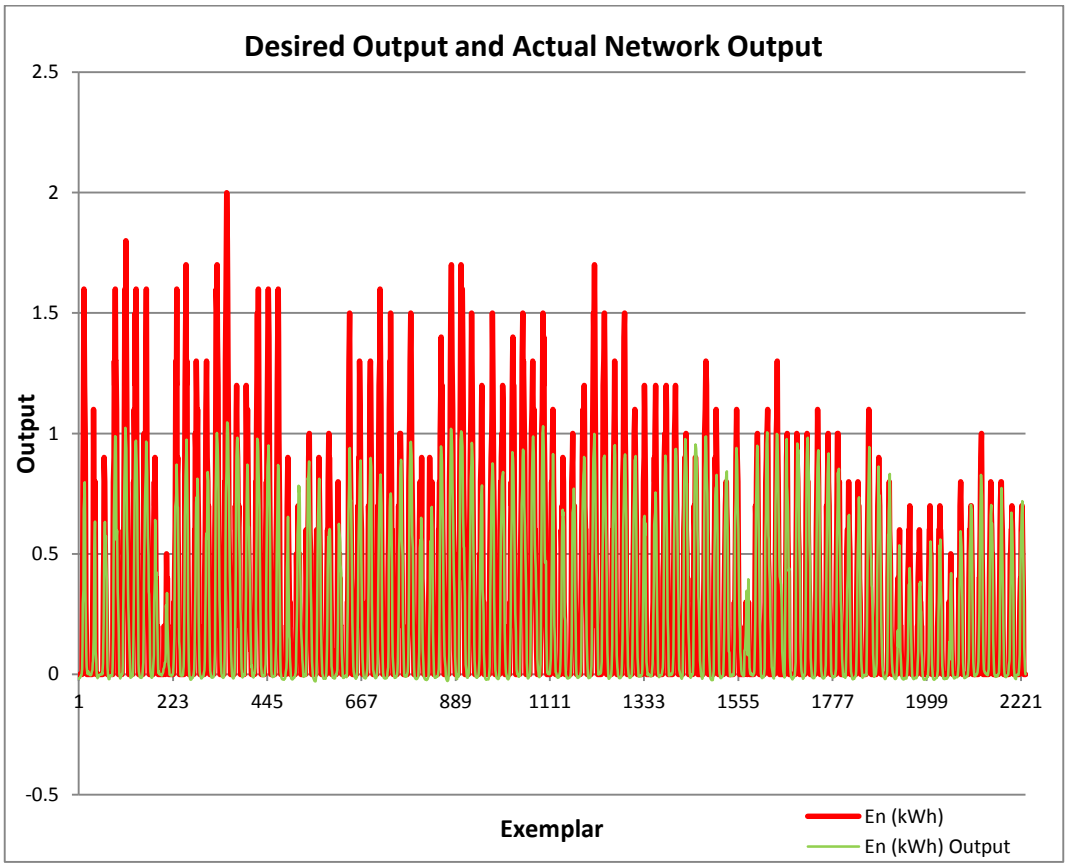


Ilustración 93. Informe gráfico de la aplicación de la red PCA al grupo de test.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.041165027
NMSE	0.227887371
MAE	0.125671727
Min Abs Error	4.60973E-06
Max Abs Error	1.01156816
r	0.902411645

Tabla 35. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red PCA al grupo de test.

El estudio de sensibilidad de la variable de salida frente a las variables de entrada dio los siguientes resultados:

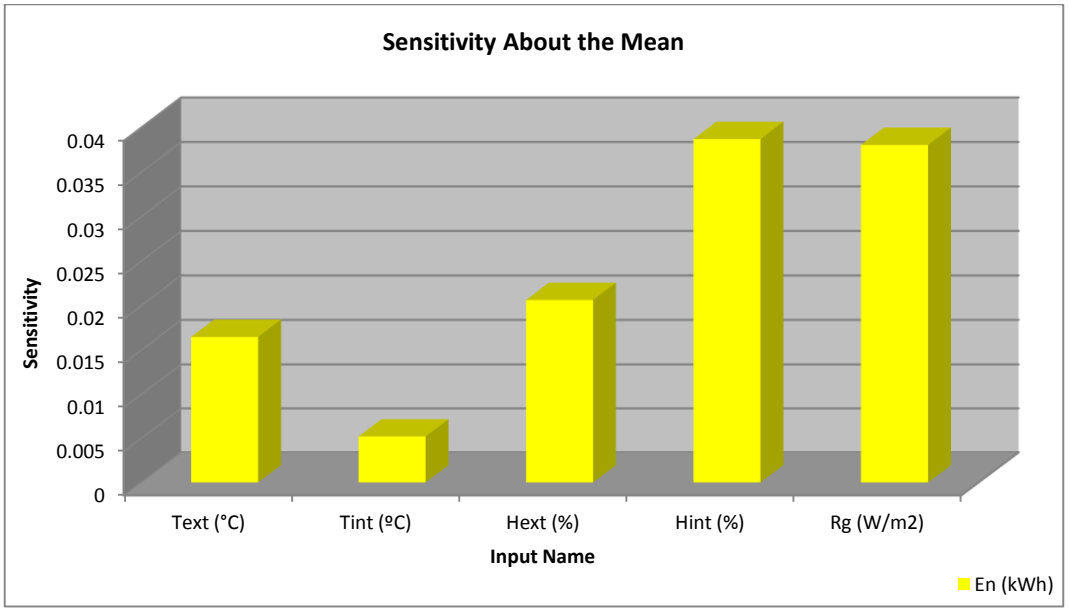


Ilustración 94. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red PCA.

Sensitivity	*En (kWh)*
Text (°C)	0.016505975
Tint (ºC)	0.005227746
Hext (%)	0.020659382
Hint (%)	0.038748913
Rg (W/m^2)	0.038087609

Tabla 36. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red PCA.

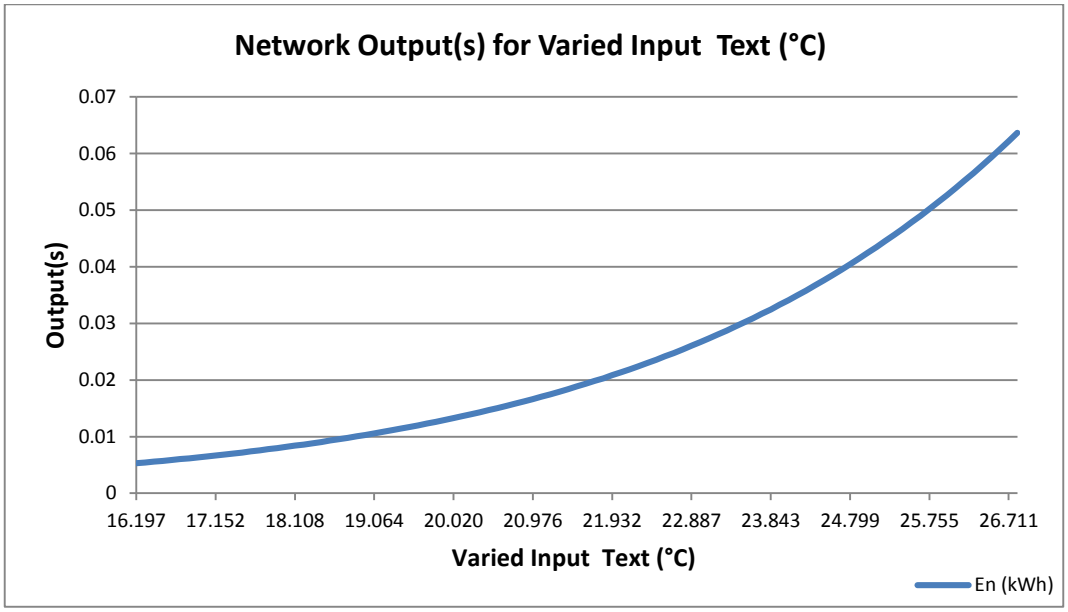


Ilustración 95. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red PCA.

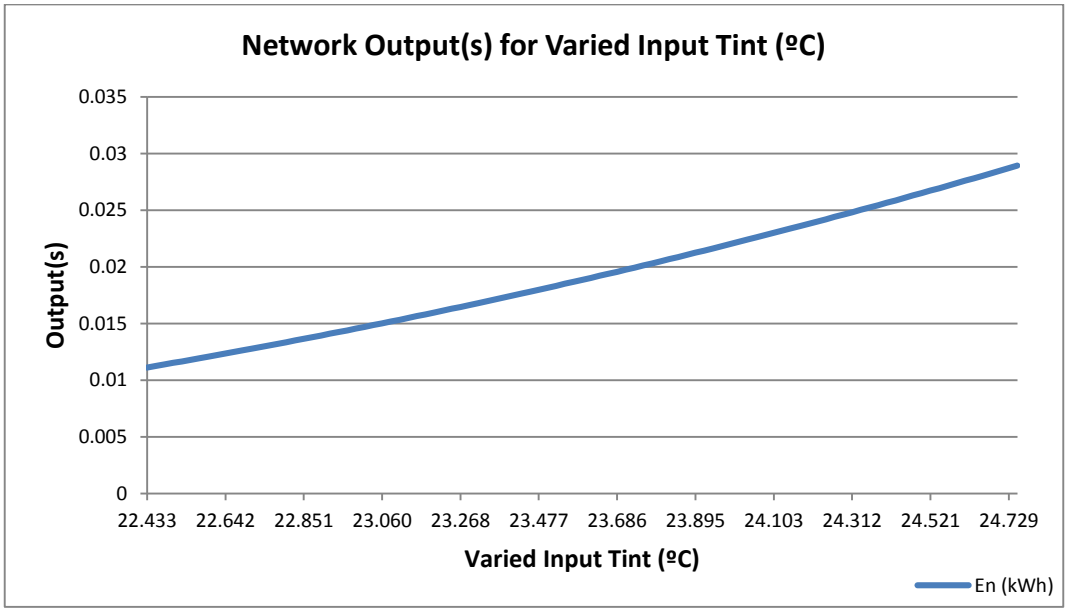


Ilustración 96 Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red PCA.

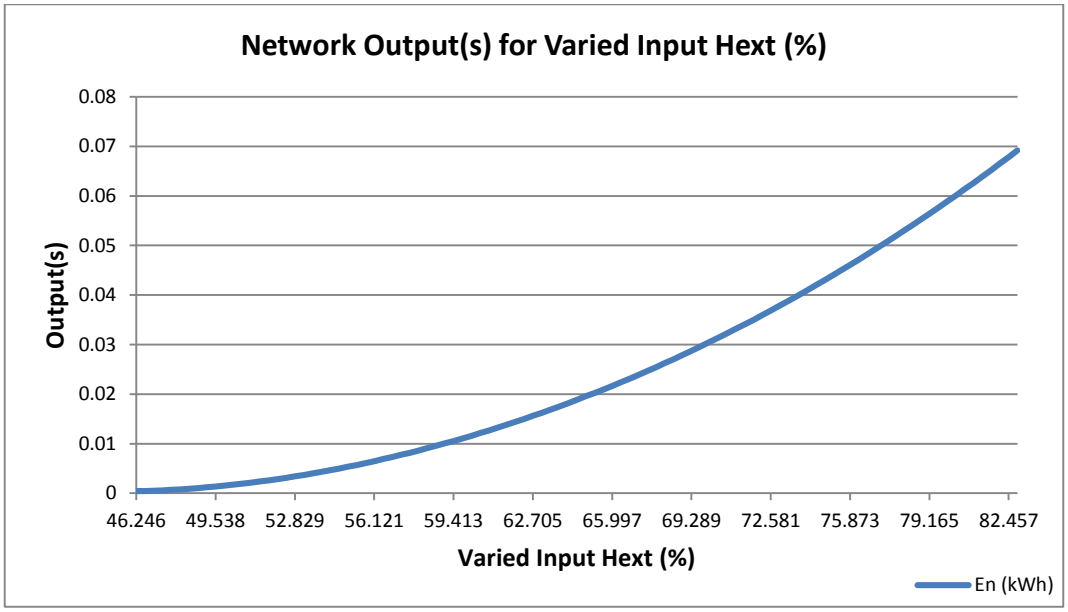


Ilustración 97. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red PCA.

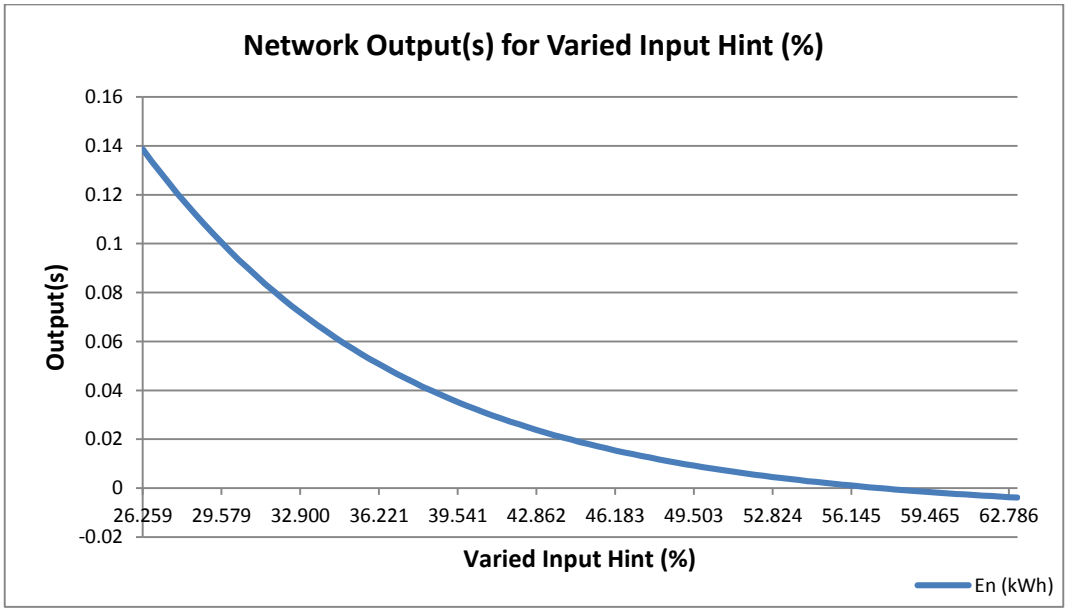


Ilustración 98. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red PCA.

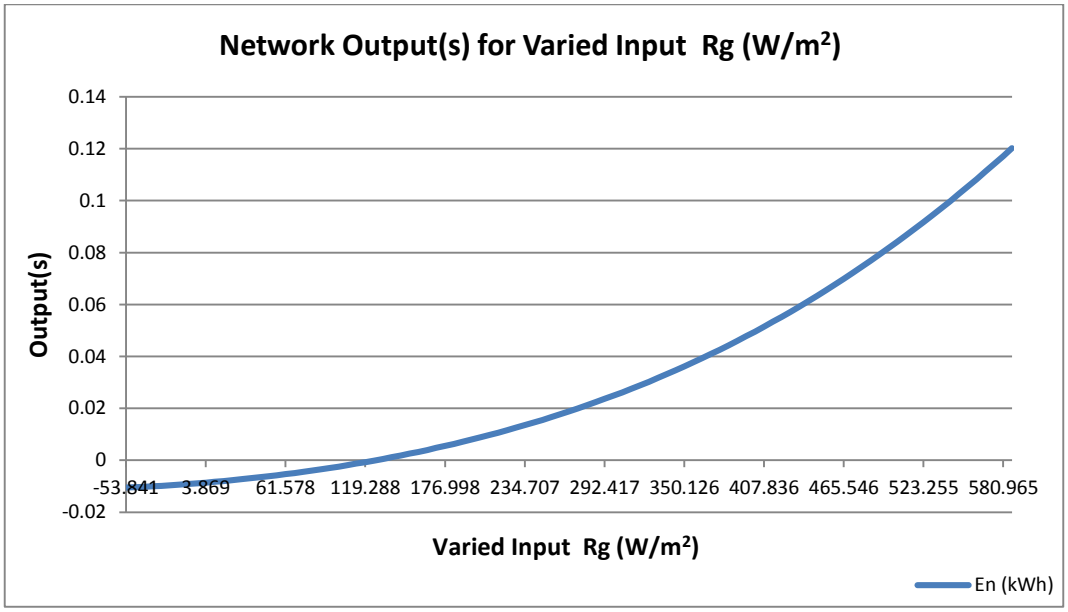


Ilustración 99. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red PCA.

Se aprecia en el análisis de sensibilidad que la máxima influencia es en la variable Humedad interior seguida de la Radiación global y la mínima en la Temperatura interior y la Humedad exterior.

6.7.3. Evaluación del error de la red PCA

Según el procedimiento de selección de una red en función del error calculamos el error de la presente según la Ecuación 1 mostrando el resultado en la Ecuación 7:

$$error_{PCA} = 0.25 \cdot 0.010619569 + 0.75 \cdot 0.013739553 = 0.012959557$$

Ecuación 7. Error ponderado de la red PCA.

6.7.4. Aplicación de la red PCA al año sin control

La red PCA entrenada modela el comportamiento del sistema de control utilizado en la instalación domótica. Tomando los datos del año sin control, el 2012, al aplicar esta red comprobamos el efecto que

hubiera tenido el sistema de control si se hubiera implementado en ese año.

El resultado del test de la red neuronal, que modela el comportamiento del sistema de control, sobre el año 2012 queda representado en la Ilustración 100 donde se muestran los datos originales de ese año junto con los datos obtenidos por la red neuronal PCA que reflejan el comportamiento del sistema si hubiese existido el control.

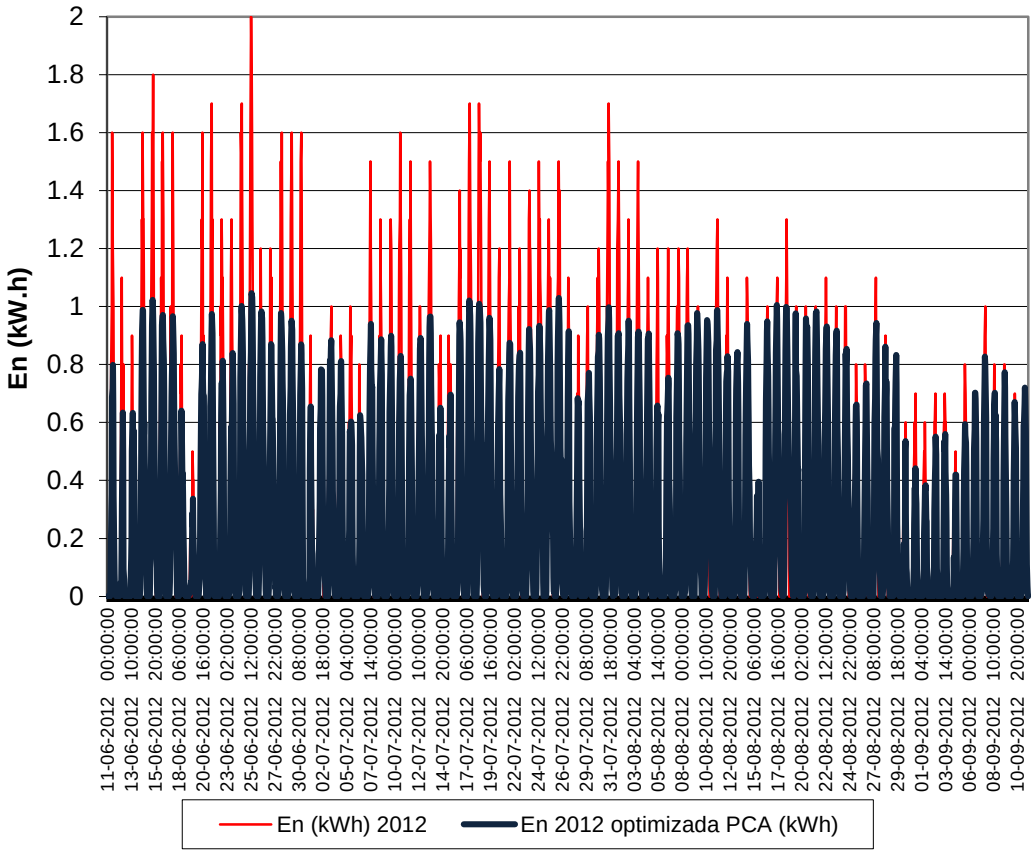


Ilustración 100. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal PCA simulando el control sobre el sistema.

En cuanto a los valores totales de energía consumida por el equipo de aire acondicionado en el periodo sin control (año 2012) fueron los siguientes:

- Año 2012 sin control: 738.5 kWh
- Año 2012 con control (red neuronal PCA): 592.0 kWh

Tomando el año 2012, la diferencia entre el consumo sin control y el consumo que habría habido utilizando el control se obtiene una diferencia de 738.5 – 592.0 = 146.5 kWh que en porcentaje supone un **ahorro del 19.8%**. Esto muestra la eficacia de la propuesta de control.

6.8. Entrenamiento de red RN

Las redes RN (Recurrent Network) o redes recurrentes son más potentes que las redes feedforward pero más complicadas de entrenar puesto que son más propensas a la divergencia. Su principal característica es la realimentación de la capa oculta sobre sí misma (Ichi Funahashi & Nakamura, 1993).

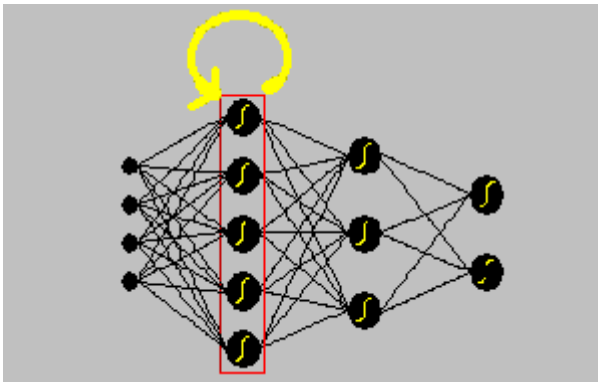


Ilustración 101. Arquitectura de una red RN.

Parcialmente, las redes RN comienzan con una red totalmente recurrente y añaden una conexión de alimentación directa que no pasa por la recurrencia, tratando la parte recurrente como una memoria de estado. Estas redes recurrentes pueden tener una profundidad de memoria infinita y encontrar así las relaciones a través del tiempo, así como a través del espacio de entrada instantáneo. La mayoría de los datos del mundo real contienen información en su estructura temporal. Las redes recurrentes son una referencia en predicción no lineal de

series de tiempo, identificación de sistemas y clasificación de patrones temporales.

6.8.1. Configuración de la red RN

Los parámetros de configuración de la red neuronal introducidos en el software Neurosolutions para comparar los resultados y comprobar el incremento en el ahorro energético han sido los siguientes:

- Tipo de red: *Recurrent Network*
- Configuración general de la red:
  - *Input PEs: 5*
  - *Output PEs: 1*
  - *Exemplars: 1698*
  - *Hidden Layers: 2*
  - *Input Layer: Axon*
  - *Recurrency: Partially Recurrent*
- Configuración de la capa oculta 1:
  - *Processing Elements: 28*
  - *Genetic Algorithm*
  - *Transfer: TanhAxon*
  - *Learning rule: Momentum*
    - *Step size: 0.01*
    - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa oculta 2:
  - *Processing Elements: 14*
  - *Genetic Algorithm*
  - *Transfer: TanhAxon*

- *Learning rule: Momentum*
  - *Step size: 0.01*
  - *Momentum: 0.7*

- Configuración de la capa de salida:
  - *Genetic Algorithm*
  - *Transfer: TanhAxon*
  - *Learning rule: Momentum*
    - *Step size: 0.01*
    - *Momentum: 0.7*

- Control de aprendizaje supervisado:
  - *Maximum Epochs: 1000*
  - *Termination: MSE, Cross Val. Set, Increase*
  - *Weight Update: Batch*

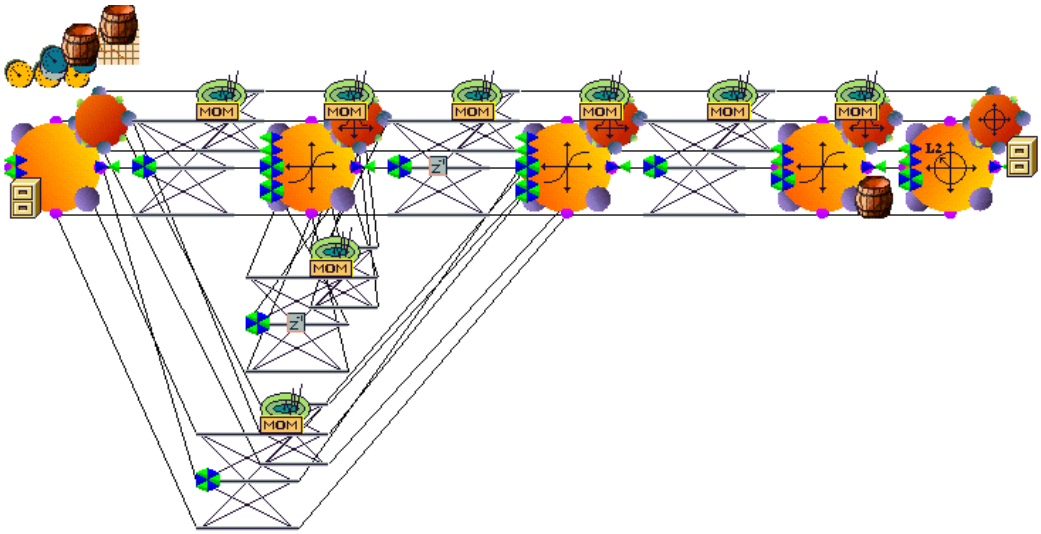


Ilustración 102. Red neuronal con topología RN.

Los datos para el entrenamiento de la red se tomaron de los del intervalo indicado anteriormente del año 2013, año con control, y se organizaron de la siguiente manera:

- Datos de entrada:
    - Temperatura interior
    - Temperatura exterior
    - Humedad relativa interior
    - Humedad relativa exterior
    - Radiación global acumulada
- Datos deseados (salida):
    - Energía eléctrica consumida

En cuanto al volumen de datos por hora se distribuyen un 80% para el entrenamiento de la red y el 20% restante para validación cruzada tras reordenarlos aleatoriamente.

6.8.2. Informes del entrenamiento de la red RN

El entrenamiento según algoritmos genéticos, basado en 100 generaciones de 20 individuos con optimización genética dio los siguientes resultados:

Como se ve en la Ilustración 103, el error en el mejor de los individuos ha ido disminuyendo conforme han evolucionado las generaciones de individuos hasta que a partir de la generación 8 no hay mejora.

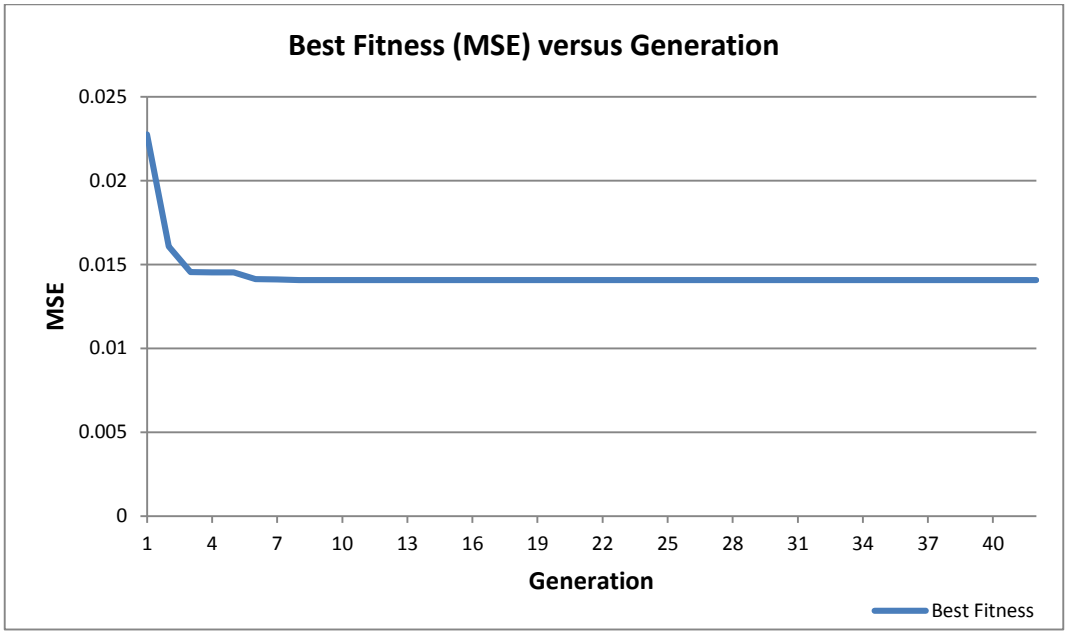


Ilustración 103. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red RN.

En la Ilustración 104 se muestra la media de los 20 individuos de la generación donde se aprecia que la primera generación era muy mala pero con operadores de cruce se van concentrando los mejores bajando progresivamente la media.

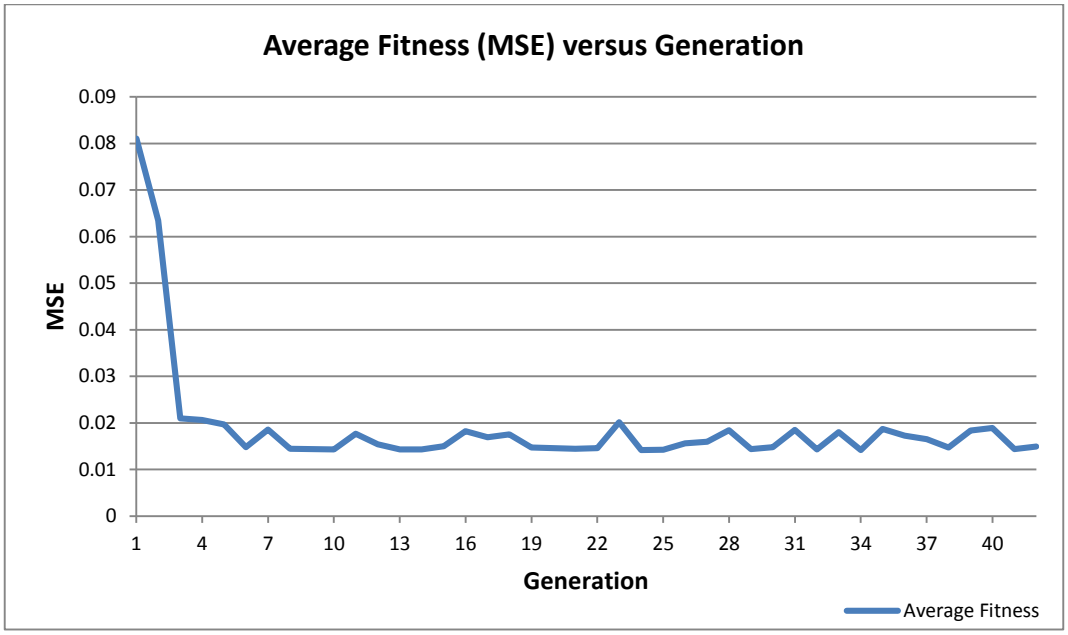


Ilustración 104. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red RN.

En la Tabla 37 se resumen los resultados anteriores:

Optimization Summary	*Best Fitness*	*Average Fitness*
Generation #	8	34
Minimum MSE	0.014081253	0.014164879
Final MSE	0.014081253	0.014907414

Tabla 37. Resumen de la optimización genética en la red RN.

En la Ilustración 105 se puede ver la comparativa de los datos originales con los que la red neuronal RN obtiene tras el ajuste de la misma con los datos de entrenamiento.

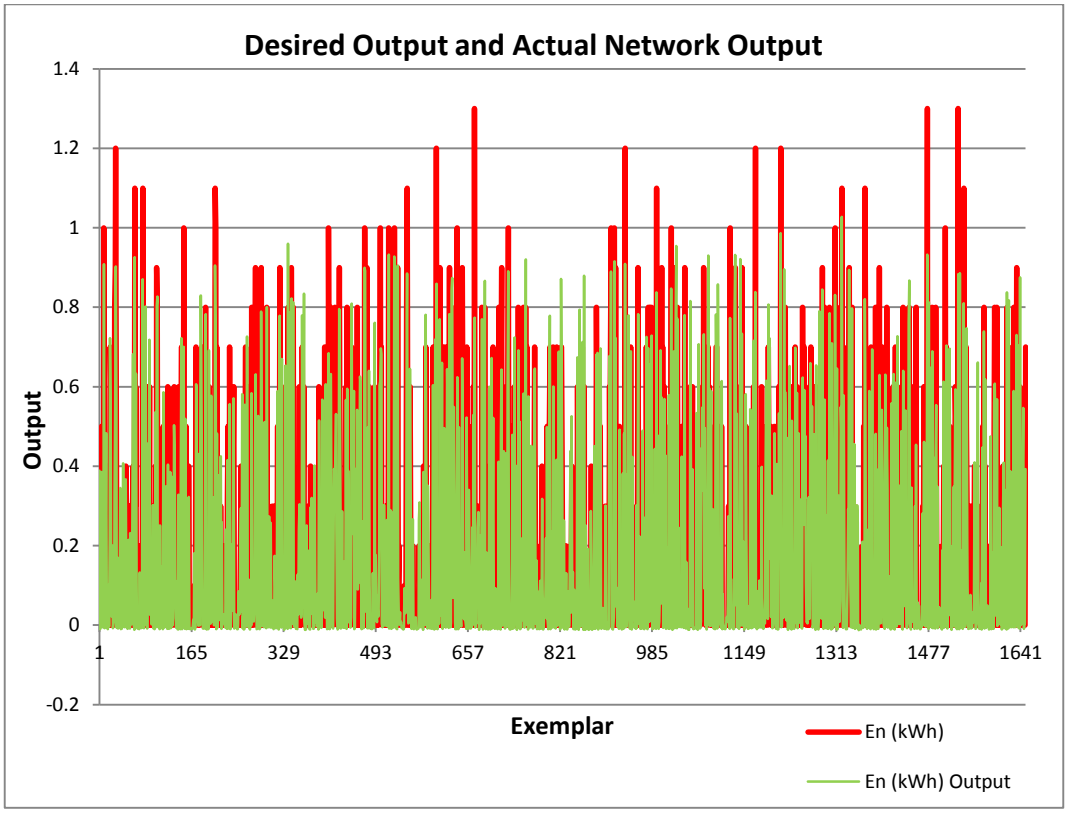


Ilustración 105. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal RN.

La Tabla 38 muestra los valores de errores de la red RN entrenada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.011100491
NMSE	0.140377796
MAE	0.063689355
Min Abs Error	4.88393E-06
Max Abs Error	0.525900781
r	0.927177406

Tabla 38. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RN al grupo de entrenamiento.

En la Ilustración 106 y en la Tabla 39 aparece el informe de la aplicación de la red neuronal RN al grupo de datos de validación cruzada.

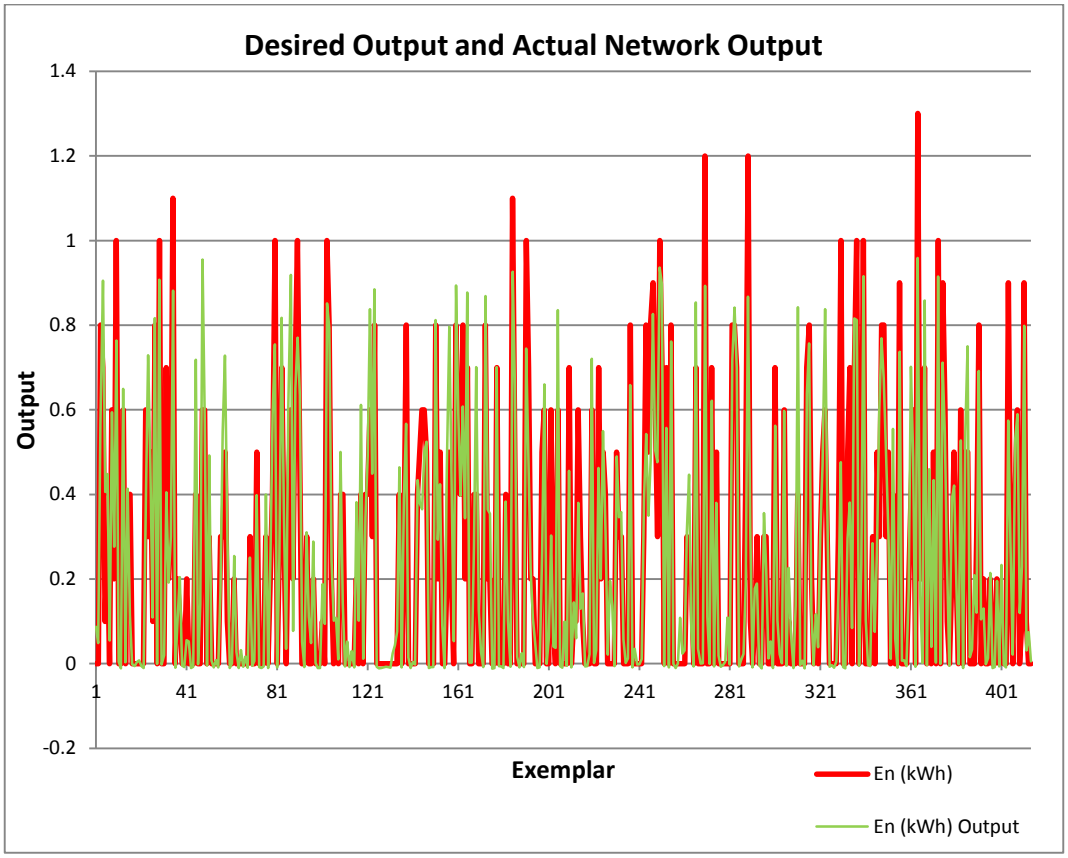


Ilustración 106. Informe gráfico de la aplicación de la red RN al grupo de validación cruzada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.014722461
NMSE	0.150991832
MAE	0.078769611
Min Abs Error	1.10814E-05
Max Abs Error	0.524122828
r	0.921770385

Tabla 39. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RN al grupo de validación cruzada.

A continuación, en la Ilustración 107 y en la Tabla 40, se muestra el informe del grupo de datos de test que no ha sido utilizado anteriormente para el entrenamiento de la red neuronal, es decir, la aplicación de la red neuronal al año sin control (2012) para comprobar el resultado si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

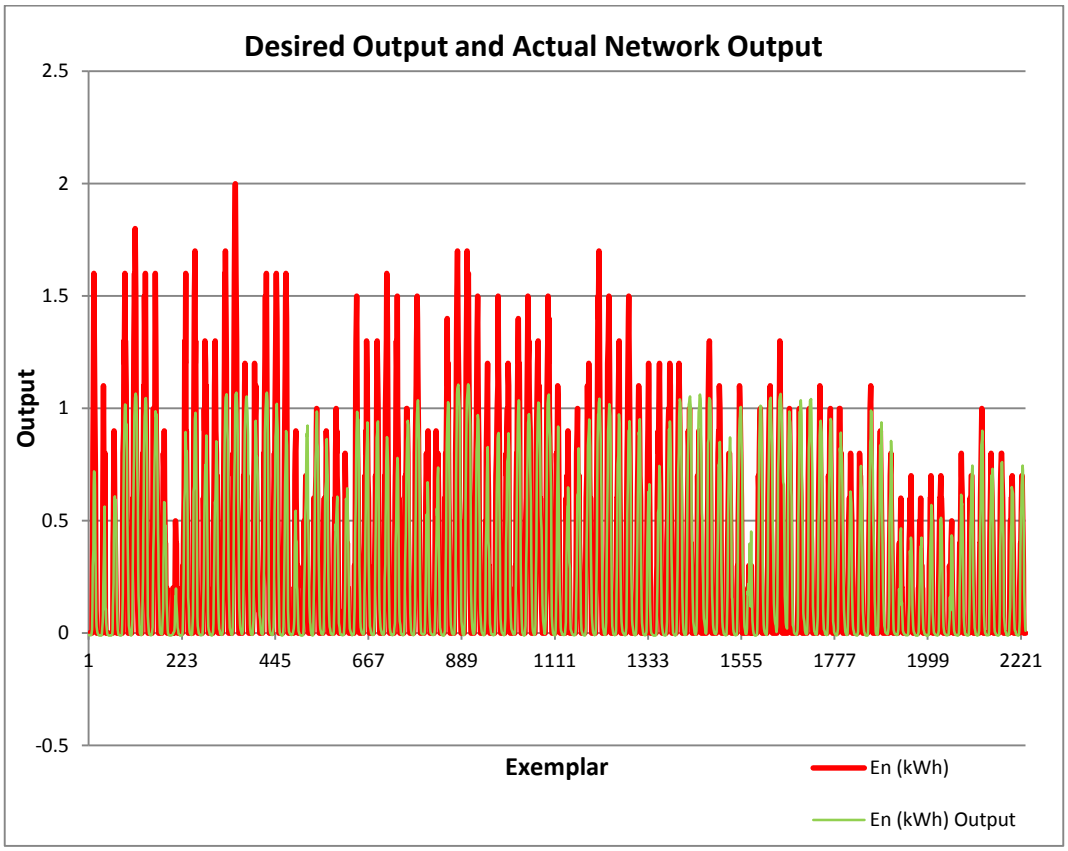


Ilustración 107. Informe gráfico de la aplicación de la red RN al grupo de test.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.050622755
NMSE	0.280244846
MAE	0.143633635
Min Abs Error	5.09076E-05
Max Abs Error	0.999112404
r	0.851576686

Tabla 40. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red RN al grupo de test.

Se ha realizado también en el software Neurosolutions un estudio de la sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada, esto es, una medida de la influencia que tiene cada una de las entradas en el valor de la salida.

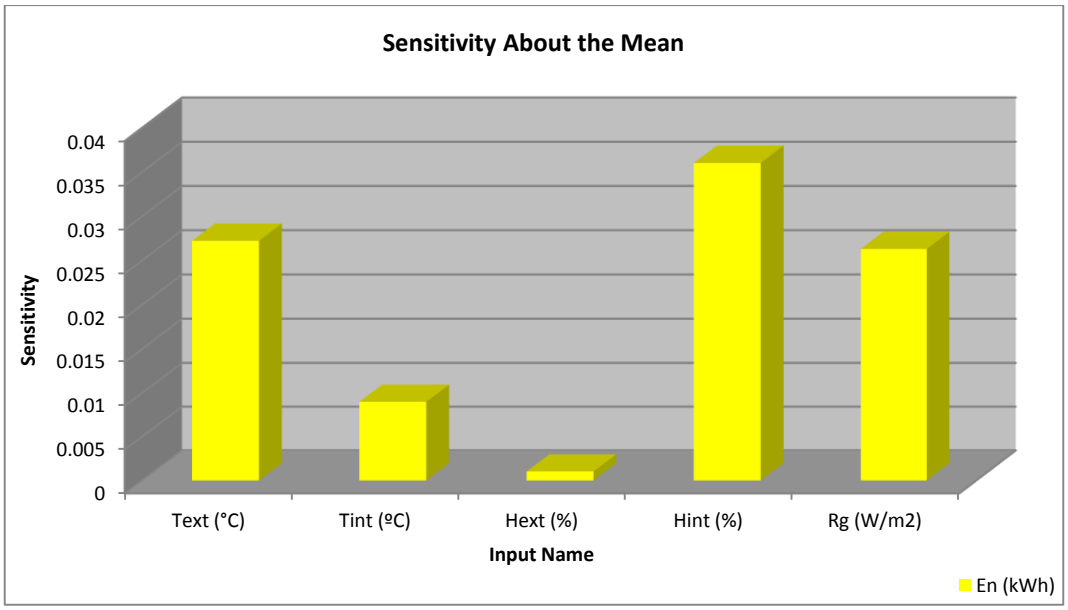


Ilustración 108. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red RN.

Sensitivity	*En (kWh)*
Text (°C)	0.027236961
Tint (ºC)	0.008996452
Hext (%)	0.001025524
Hint (%)	0.036032649
Rg (W/m^2)	0.026309675

Tabla 41. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red RN.

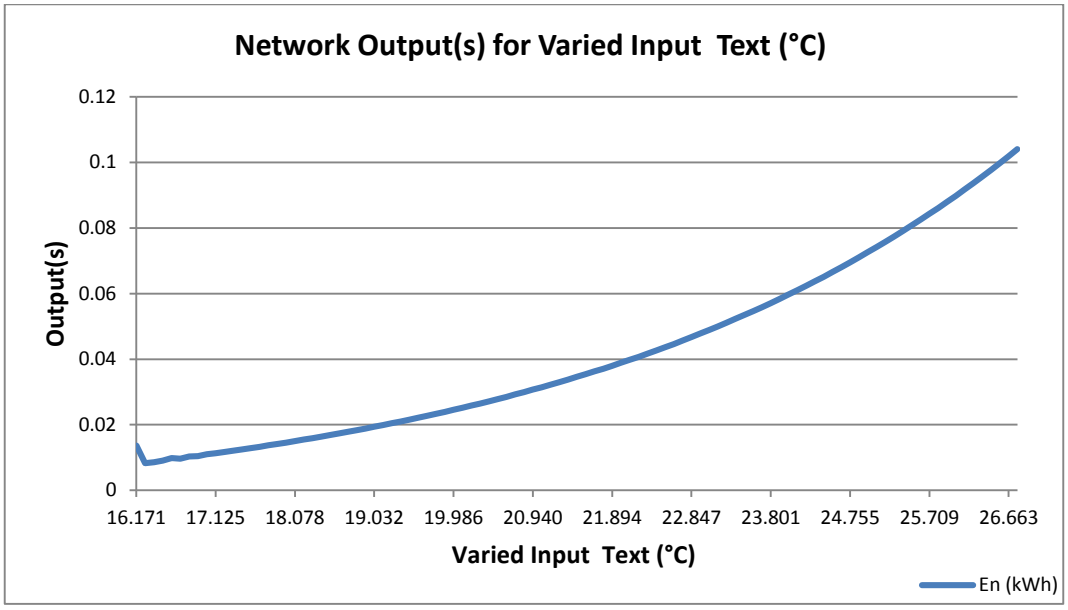


Ilustración 109. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red RN.

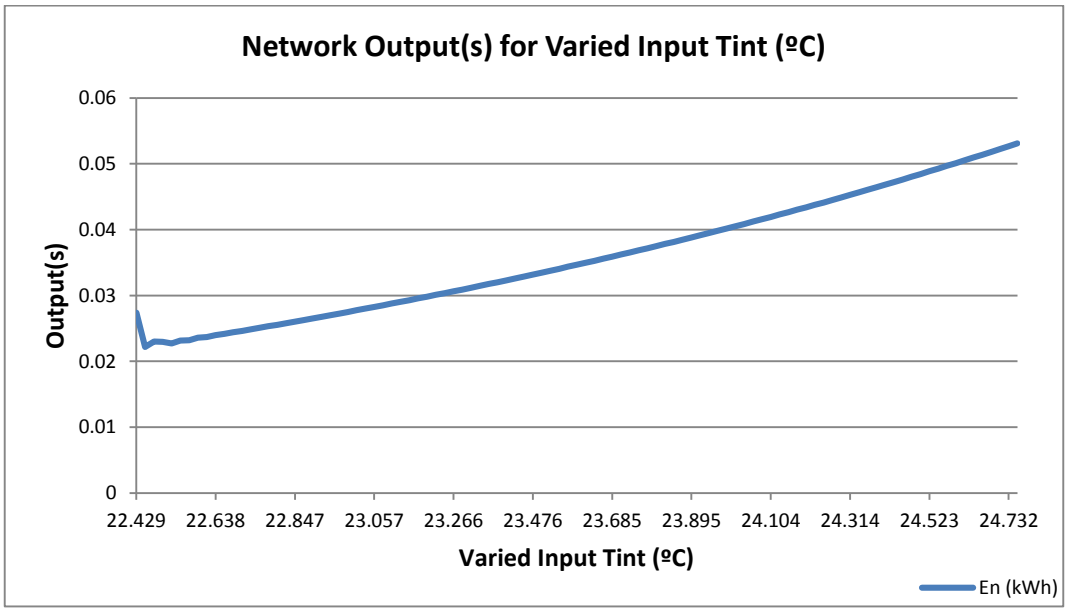


Ilustración 110. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red RN.

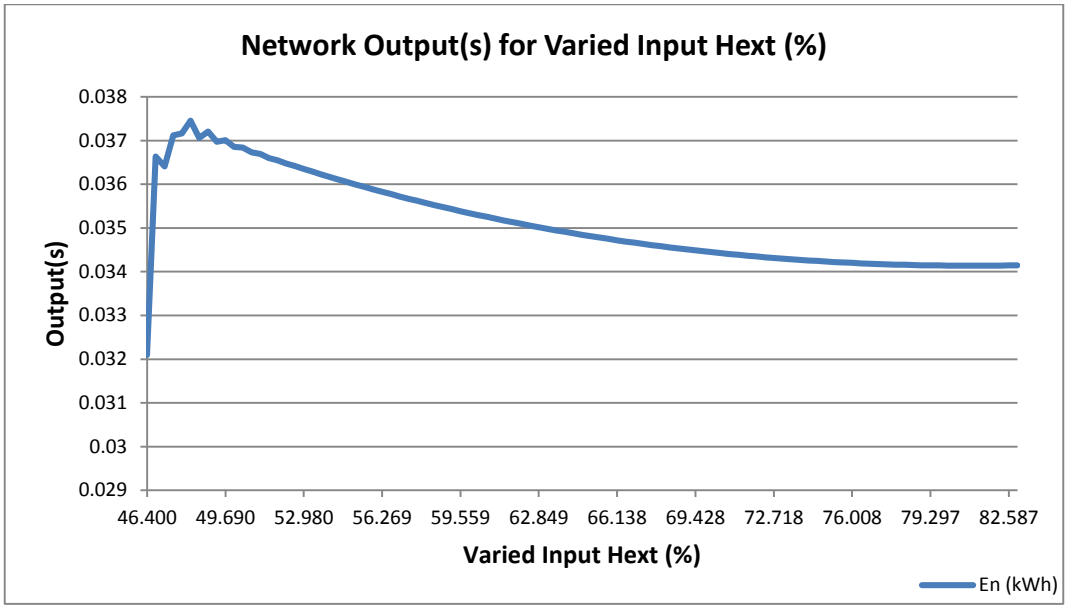


Ilustración 111. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red RN.

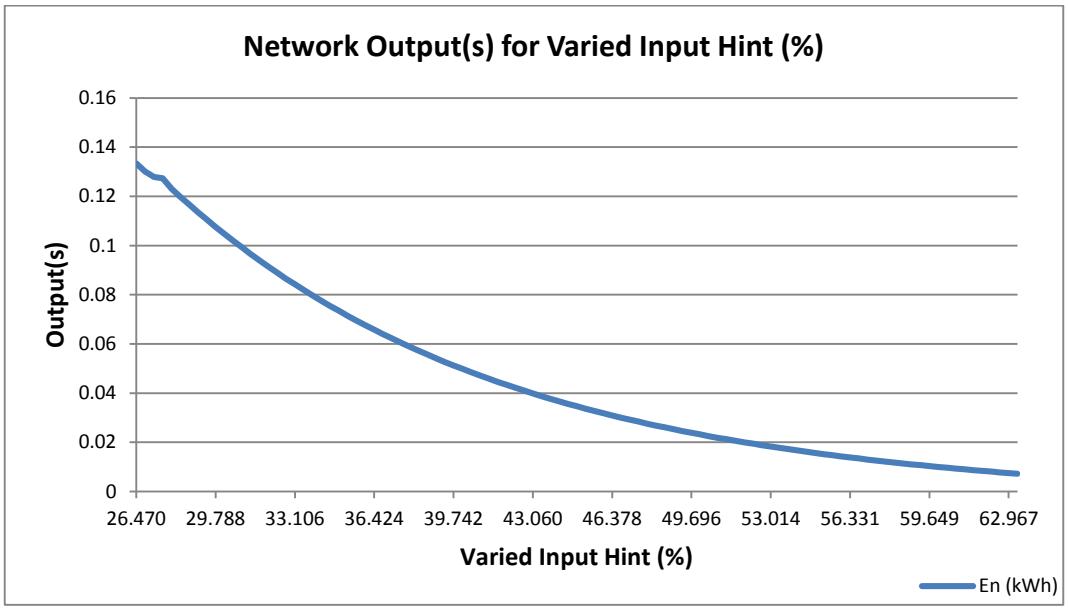


Ilustración 112. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red RN.

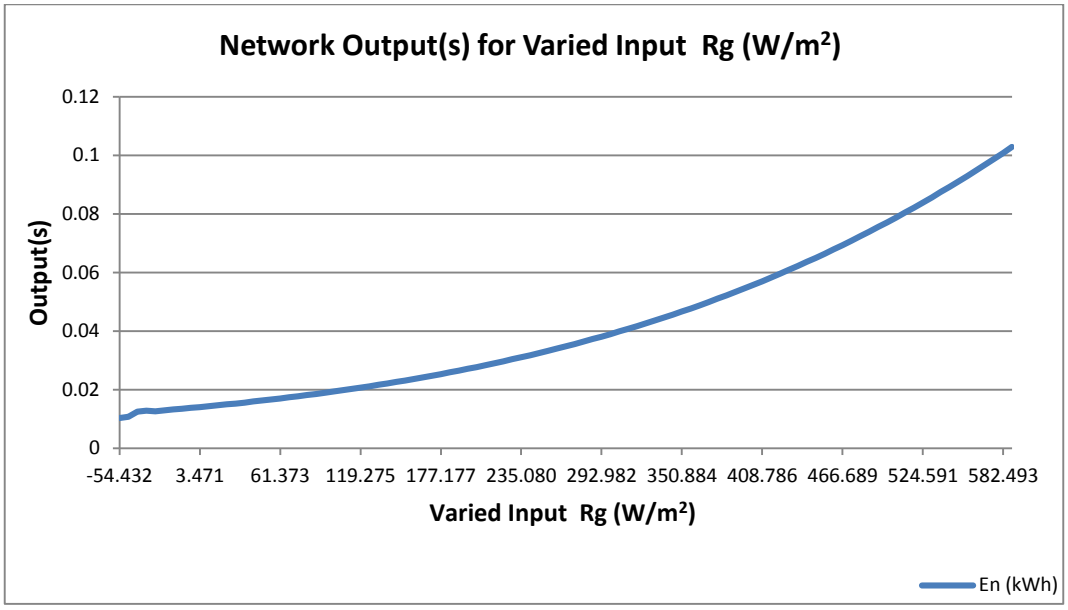


Ilustración 113. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red RN.

Se aprecia en el análisis de sensibilidad que la máxima influencia es en la variable Humedad interior, seguido de la Temperatura exterior y la Radiación global y la mínima en la Humedad exterior y Temperatura interior.

6.8.3. Evaluación del error de la red RN

Según el procedimiento de selección de una red en función del error calculamos el error de la presente según la Ecuación 1 con resultado mostrado en la Ecuación 8:

$$error_{\mathrm{RN}} = 0.25 \cdot 0.011100491 + 0.75 \cdot 0.014722461 = 0.0138169685$$

Ecuación 8. Error ponderado de la red RN.

6.8.4. Aplicación de la red RN al año sin control

Esta red RN entrenada modela el comportamiento del sistema de control utilizado en la instalación domótica. A partir de los datos del año

2012, año sin control, se aplica la red neuronal para comprobar cuál hubiera sido el consumo energético si se hubiese empleado el sistema de control de persianas en ese año.

El resultado del test de la red neuronal, que modela el comportamiento del sistema de control, sobre el año 2012 queda representado en la Ilustración 114 donde se muestran los datos originales de ese año junto con los datos obtenidos por la red neuronal RN que reflejan el comportamiento del sistema si hubiese existido el control.

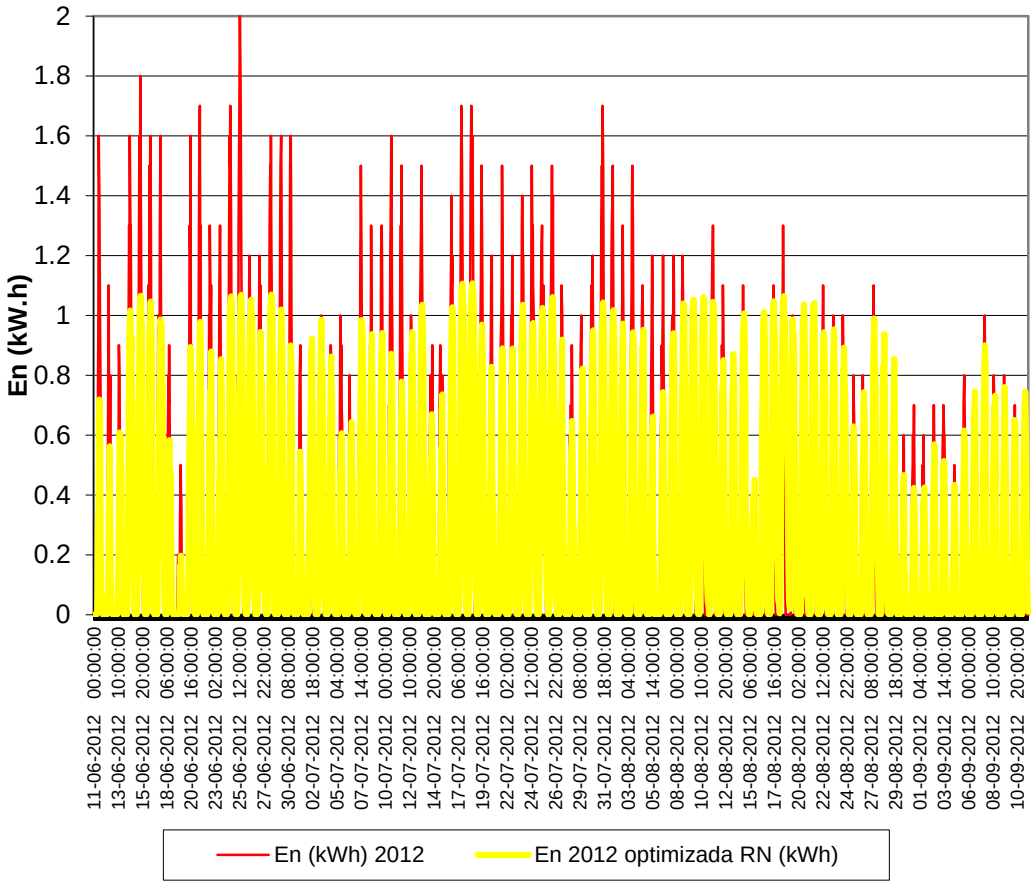


Ilustración 114. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal RN simulando el control sobre el sistema.

En cuanto a los valores totales de energía consumida por el equipo de aire acondicionado en el periodo sin control (año 2012) fueron los siguientes:

- Año 2012 sin control: 738.5 kWh
- Año 2012 con control (red neuronal RN): 669.7 kWh

Tomando el año 2012, la diferencia entre el consumo sin control y el consumo que habría habido utilizando el control se obtiene una diferencia de 738.5 – 669.7 = 68.8 kWh que en porcentaje supone un **ahorro del 9.3%**. Esto muestra la eficacia de la propuesta de control.

6.9. Entrenamiento de red SOFMN

Las redes neuronales SOFMN (Self-Organizing Feature Map Network) son redes que generan un mapa utilizando una función de vecindad que conserva las propiedades de las entradas (Kohonen, 1990).

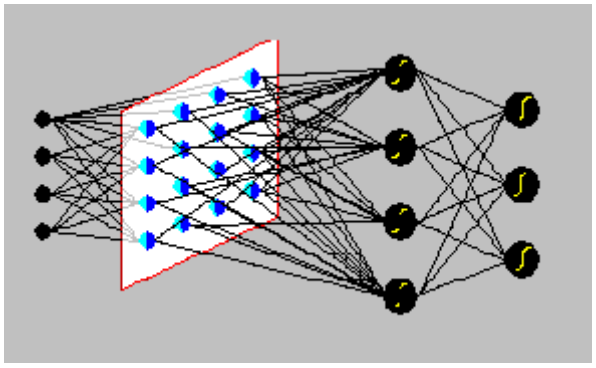


Ilustración 115. Arquitectura de una red SOFMN.

Las redes SOFMN transforman la entrada de dimensión arbitraria en un mapa discreto de una o dos dimensiones sujeto a una topología restringida (preservando el vecindario). Los mapas de características se calculan utilizando el aprendizaje no supervisado de Kohonen. La salida de la red SOFMN se puede utilizar como entrada a una red neuronal de clasificación supervisada como la red MLP.

La principal ventaja de esta red es la agrupación producida, lo que reduce el espacio de entrada en funciones de representación que utilizan un proceso de auto-organización. Por lo tanto la estructura subyacente del espacio de entrada se mantiene, mientras que la dimensionalidad del espacio se reduce.

6.9.1. Configuración de la red SOFMN

Los parámetros de configuración de la red neuronal introducidos en el software Neurosolutions para comparar los resultados y comprobar el incremento en el ahorro energético han sido los siguientes:

- Tipo de red: *Self-Organizing Feature Map Network*
- Configuración general de la red:
    - *Input PEs: 5*
    - *Output PEs: 1*
    - *Exemplars: 1650*
    - *Hidden Layers: 2*
    - *Rows: 5*
    - *Columns: 5*
    - *Starting Radius: 2*
    - *Final Radius: 0*
    - *Neightborhood Shape: SquareKohonenFull*
- Configuración de la capa oculta 1:
    - *Processing Elements: 27*
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*

        - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa oculta 2:
    - *Processing Elements: 13*
    - *Genetic Algorithm*
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Configuración de la capa de salida:
    - *Transfer: TanhAxon*
    - *Learning rule: Momentum*
        - *Step size: 0.01*
        - *Momentum: 0.7*
- Control de aprendizaje no supervisado:
    - *Maximum Epochs: 100*
    - *Termination: Weight Change, Threshold: 0.001*
    - *Learning rate Start at: 0.01*
    - *Learning rate Decay to: 0.001*
- Control de aprendizaje supervisado:
    - *Maximum Epochs: 1000*
    - *Termination: MSE, Cross Val. Set, Increase*
    - *Weight Update: Batch*

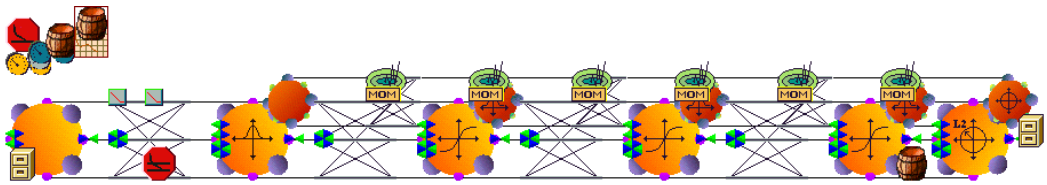


Ilustración 116. Red neuronal con arquitectura SOFMN.

Los datos para el entrenamiento de la red se tomaron de los del intervalo indicado anteriormente del año 2013, año con control, y se organizaron de la siguiente manera:

- Datos de entrada:
  - Temperatura interior
  - Temperatura exterior
  - Humedad relativa interior
  - Humedad relativa exterior
  - Radiación global acumulada
- Datos deseados (salida):
  - Energía eléctrica consumida

En cuanto al volumen de datos por hora se distribuyen un 80% para el entrenamiento de la red y el 20% restante para validación cruzada tras reordenarlos aleatoriamente.

6.9.2. Informes del entrenamiento de la red SOFMN

El entrenamiento según algoritmos genéticos, basado en 100 generaciones de 50 individuos con optimización genética dio los siguientes resultados:

Como se ve en la Ilustración 117, el error en el mejor de los individuos ha ido disminuyendo conforme han evolucionado las generaciones de individuos hasta la generación 14.

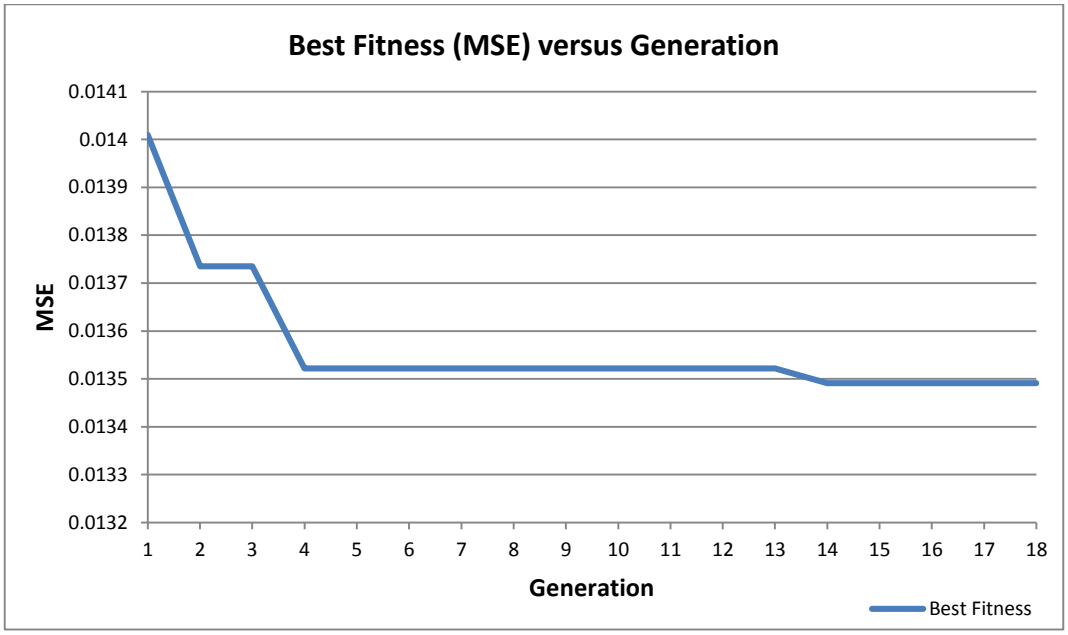


Ilustración 117. Evolución del error cuadrático medio (MSE) en el mejor individuo de la red SOFMN.

En la Ilustración 118 se muestra la media de los 18 individuos de la generación donde se aprecia que la primera generación era muy mala pero con operadores de cruce se van concentrando los mejores bajando progresivamente la media.

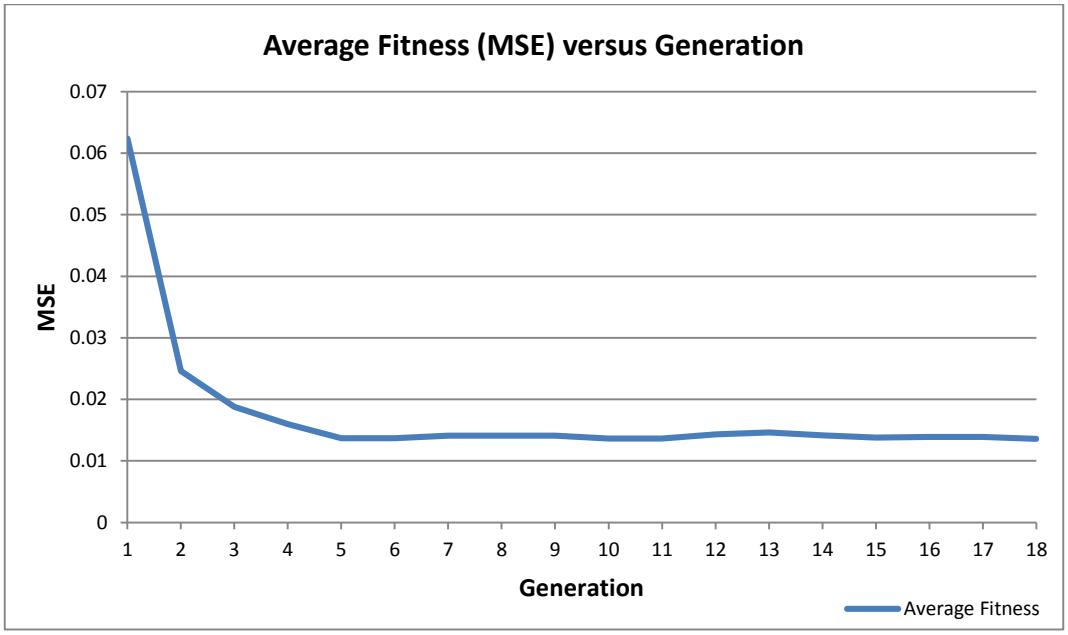


Ilustración 118. Media del error cuadrático medio (MSE) en los individuos en cada generación de la red SOFMN.

En la Tabla 42 se resumen los resultados anteriores:

Optimization Summary	*Best Fitness*	*Average Fitness*
Generation #	14	18
Minimum MSE	0.013491103	0.013580996
Final MSE	0.013491103	0.013580996

Tabla 42. Resumen de la optimización genética en la red SOFMN.

En la Ilustración 119 se puede ver la comparativa de los datos originales con los que la red neuronal SOFMN obtiene tras el ajuste de la misma con los datos de entrenamiento.

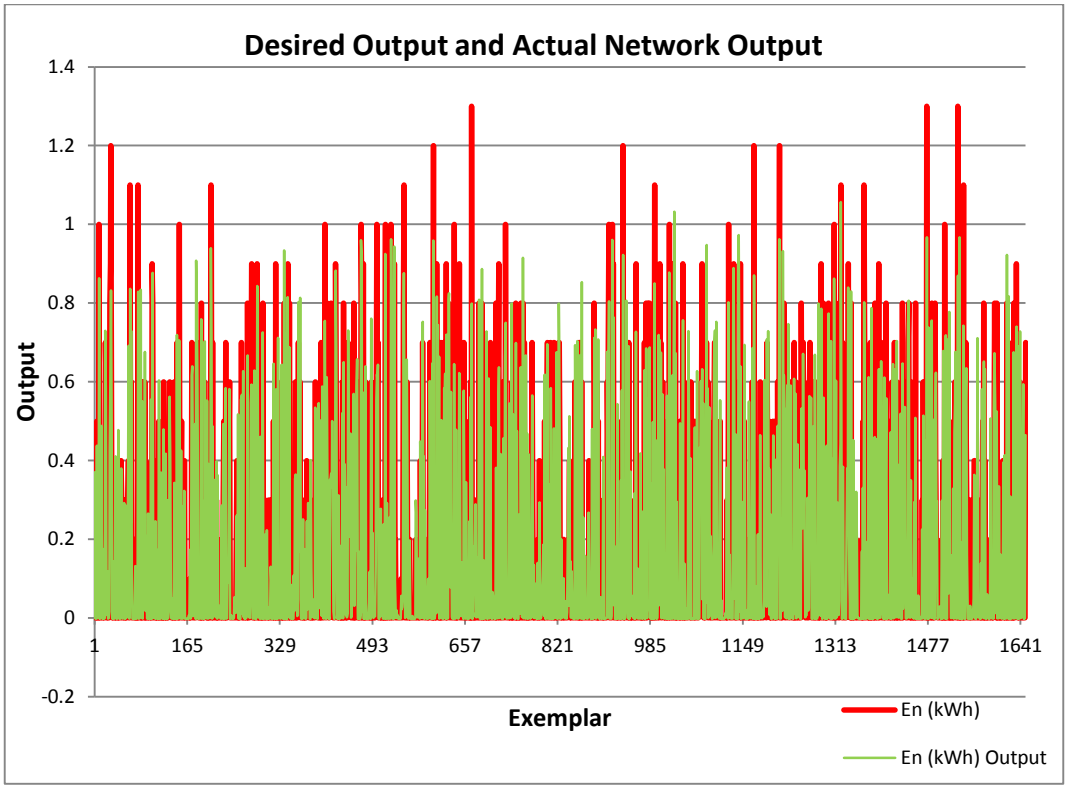


Ilustración 119. Comparativa entre los datos de entrenamiento y los de salida de la red neuronal SOFMN.

La Tabla 43 muestra los valores de errores de la red SOFMN entrenada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.011086811
NMSE	0.140204795
MAE	0.060249739
Min Abs Error	4.10906E-06
Max Abs Error	0.621208211
r	0.927251502

Tabla 43. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red SOFMN al grupo de entrenamiento.

En la Ilustración 120 y en la Tabla 44 aparece el informe de la aplicación de la red neuronal SOFMN al grupo de datos de validación cruzada.

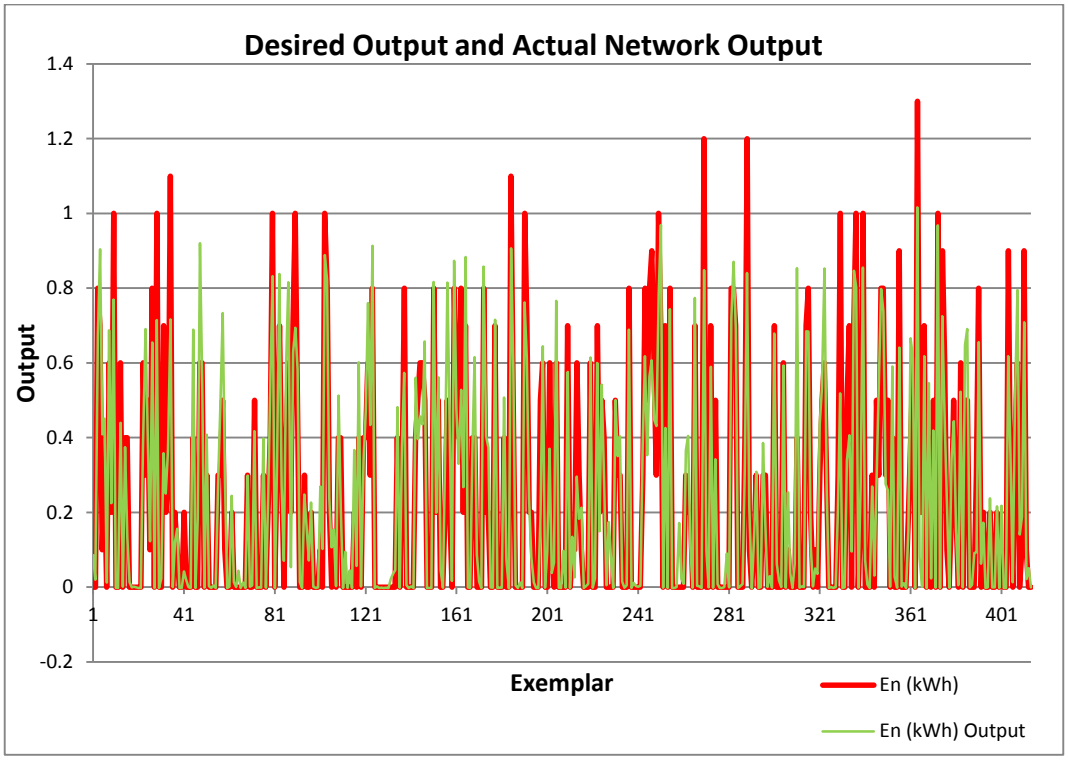


Ilustración 120. Informe gráfico de la aplicación de la red SOFMN al grupo de validación cruzada.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.014074052
NMSE	0.144341825
MAE	0.075037291
Min Abs Error	1.36006E-06
Max Abs Error	0.4816954
r	0.92505303

Tabla 44. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red SOFMN al grupo de validación cruzada.

A continuación, en la Ilustración 121 y en la Tabla 45, se muestra el informe del grupo de datos de test que no ha sido utilizado anteriormente para el entrenamiento de la red neuronal, es decir, la aplicación de la red neuronal al año sin control (2012) para comprobar el resultado si se hubiese aplicado el algoritmo de control.

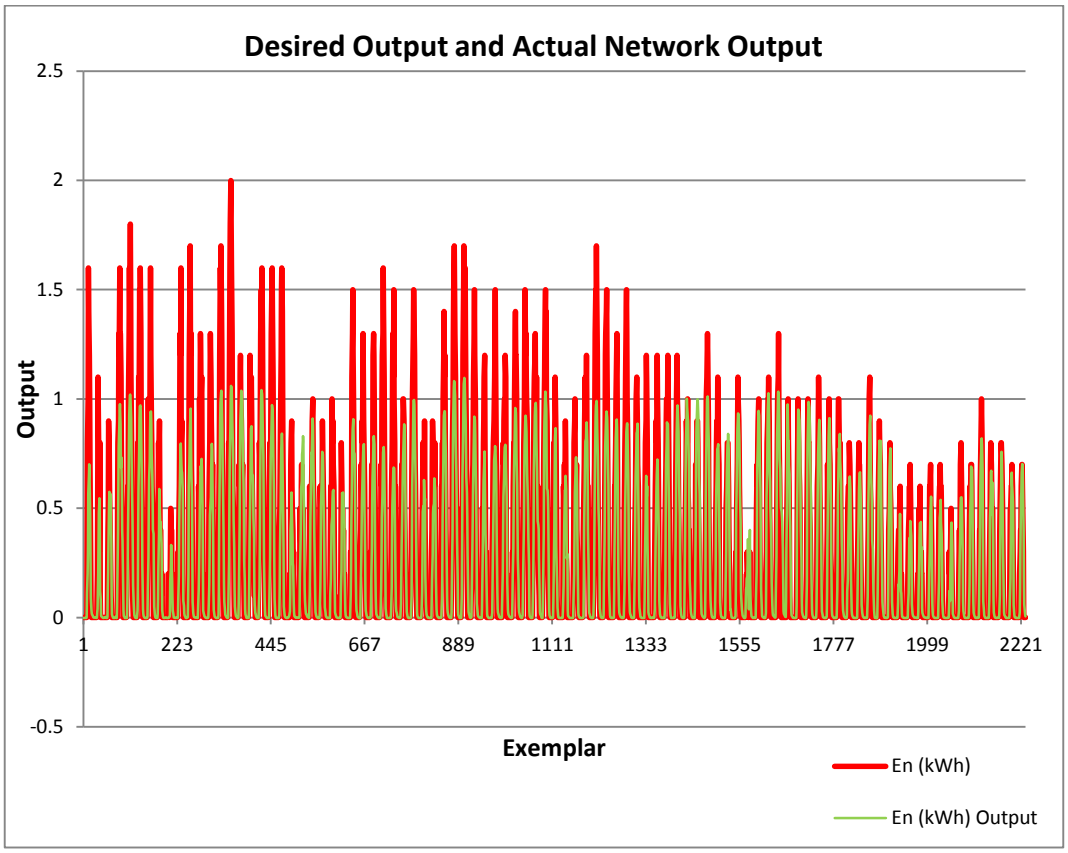


Ilustración 121. Informe gráfico de la aplicación de la red SOFMN al grupo de test.

Performance	*En (kWh)*
MSE	0.044491361
NMSE	0.24630178
MAE	0.126885999
Min Abs Error	3.67115E-06
Max Abs Error	1.034046988
r	0.891072821

Tabla 45. Informe de errores de ajuste de la aplicación de la red SOFMN al grupo de test.

El estudio de sensibilidad de la variable de salida frente a las variables de entrada dio los siguientes resultados:

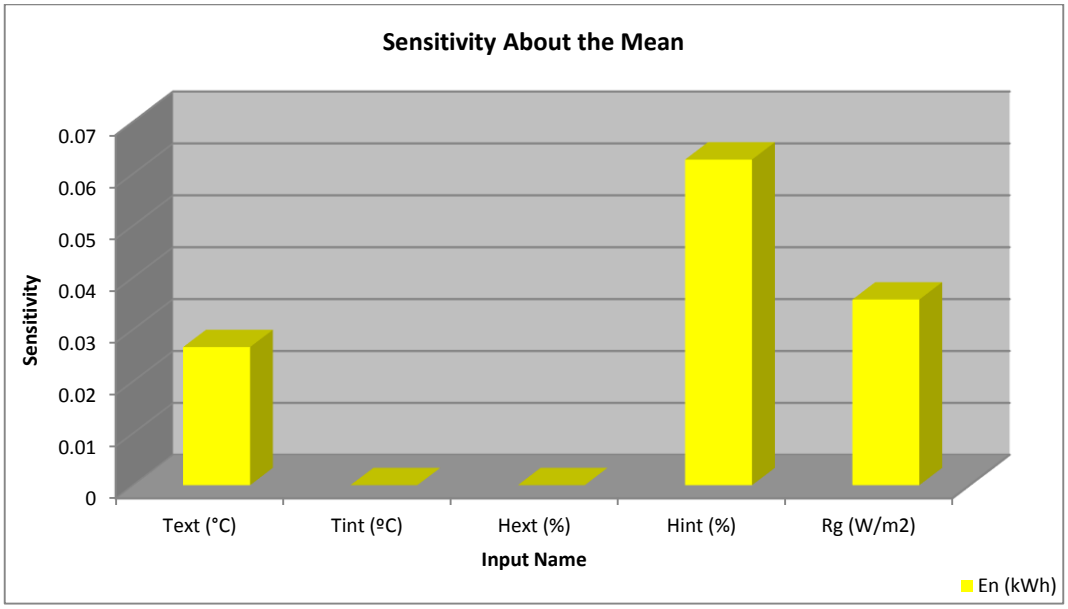


Ilustración 122. Gráfico de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red SOFMN.

Sensitivity	*En (kWh)*
Text (°C)	0.026604091
Tint (ºC)	1.04603E-17
Hext (%)	1.04603E-17
Hint (%)	0.062747142
Rg (W/m^2)	0.035771657

Tabla 46. Valores de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada para la red SOFMN.

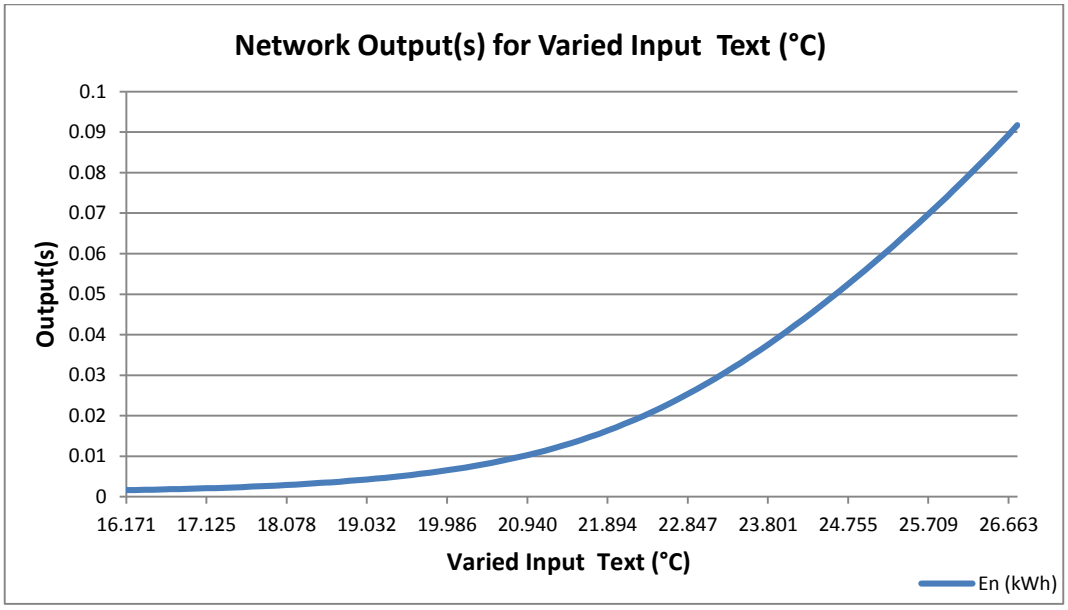


Ilustración 123. Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura exterior para la red SOFMN.

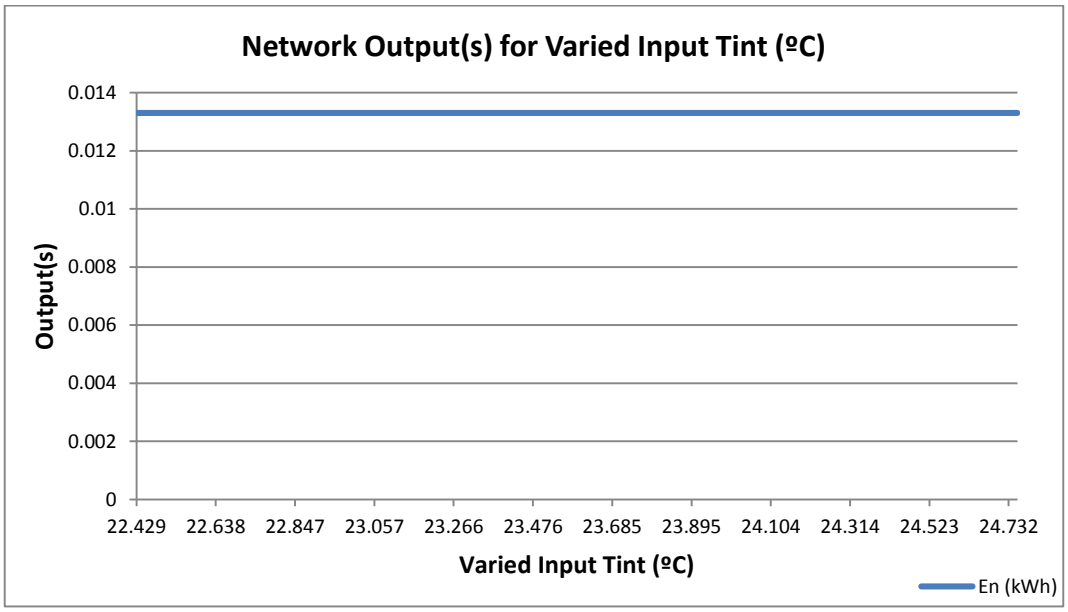


Ilustración 124 Variación de la salida frente a la variable de entrada Temperatura interior para la red SOFMN.

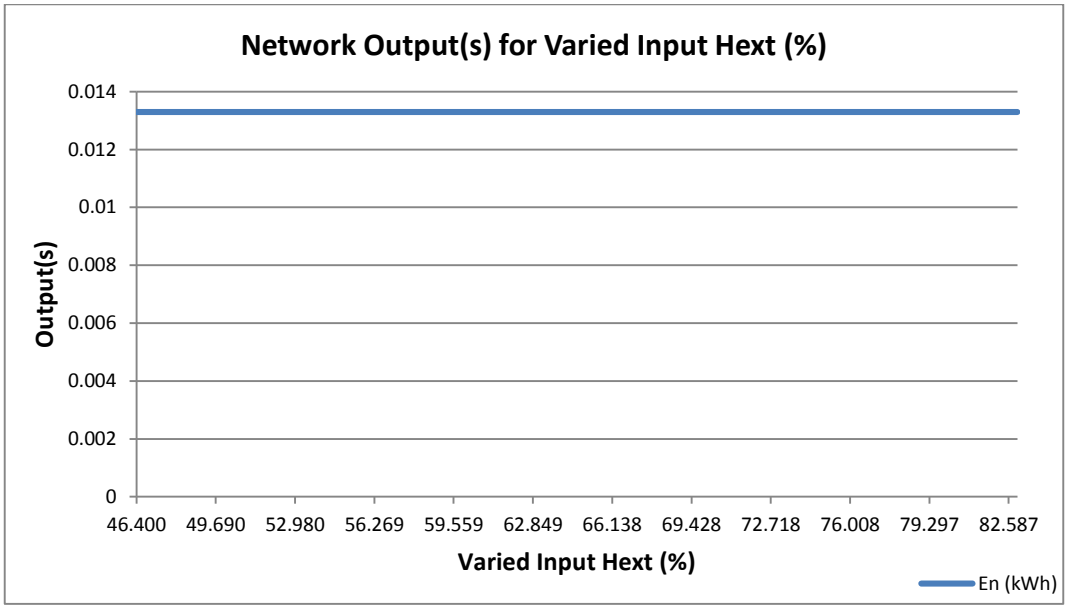


Ilustración 125. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad exterior para la red SOFMN.

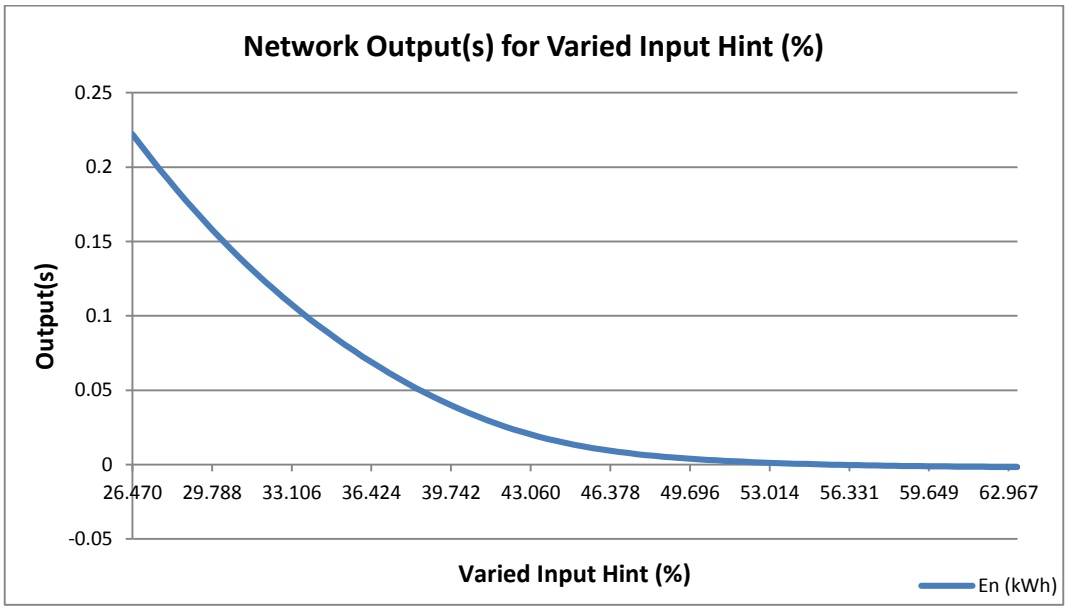


Ilustración 126. Variación de la salida frente a la variable de entrada Humedad interior para la red SOFMN.

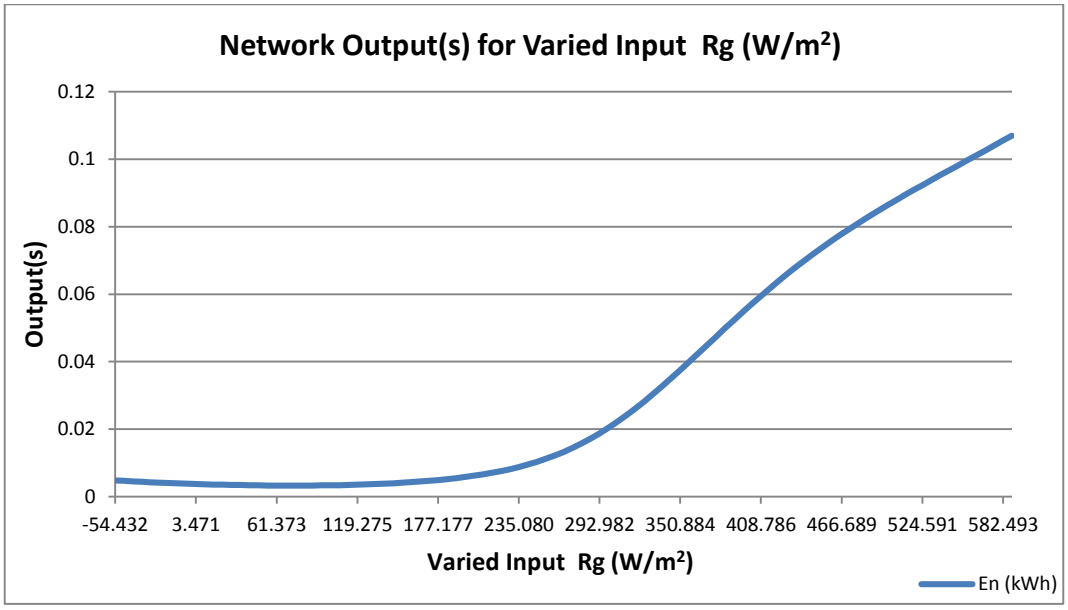


Ilustración 127. Variación de la salida frente a la variable de entrada Radiación global para la red SOFMN.

Se aprecia en el análisis de sensibilidad que la máxima influencia es en la variable Humedad interior seguida de la Radiación global y la mínima en la Temperatura interior y la Humedad exterior.

6.9.3. Evaluación del error de la red SOFMN

Según el procedimiento de selección de una red en función del error calculamos el error de la presente según la Ecuación 1 mostrando el resultado en la Ecuación 9:

$$error_{\text{SOFMN}} = 0.25 \cdot 0.011086811 + 0.75 \cdot 0.014074052 = 0.01332724175$$

Ecuación 9. Error ponderado de la red SOFMN.

6.9.4. Aplicación de la red SOFMN al año sin control

La red SOFMN entrenada modela el comportamiento del sistema de control utilizado en la instalación domótica. Tomando los datos del año sin control, el 2012, al aplicar esta red comprobamos el efecto que

hubiera tenido el sistema de control si se hubiera implementado en ese año.

El resultado del test de la red neuronal, que modela el comportamiento del sistema de control, sobre el año 2012 queda representado en la Ilustración 128 donde se muestran los datos originales de ese año junto con los datos obtenidos por la red neuronal SOFMN que reflejan el comportamiento del sistema si hubiese existido el control.

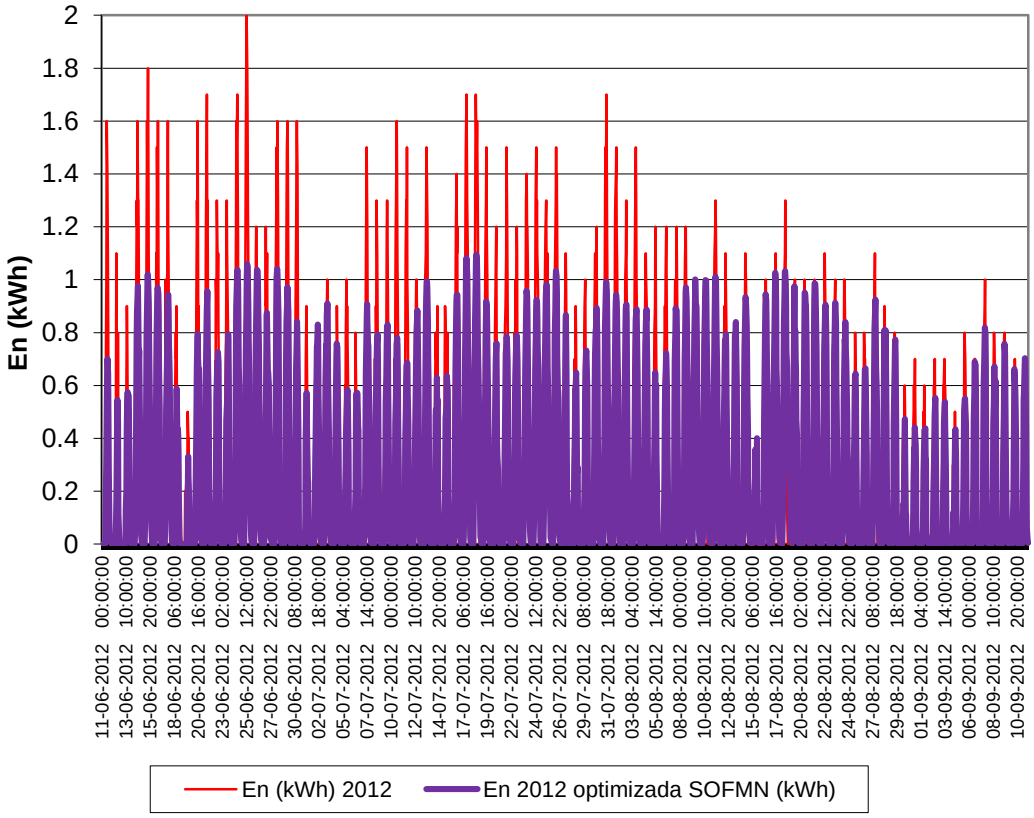


Ilustración 128. Comparativa en el año 2012 entre los datos reales y los datos optimizados aplicando la red neuronal SOFMN simulando el control sobre el sistema.

En cuanto a los valores totales de energía consumida por el equipo de aire acondicionado en el periodo sin control (año 2012) fueron los siguientes:

- Año 2012 sin control: 738.5 kWh
- Año 2012 con control (red neuronal SOFMN): 587.7 kWh

Tomando el año 2012, la diferencia entre el consumo sin control y el consumo que habría habido utilizando el control se obtiene una diferencia de 738.5 – 587.7 = 150.8 kWh que en porcentaje supone un **ahorro del 20.4%**. Esto muestra la eficacia de la propuesta de control.

7. Comparativa de resultados

7.1. Comparativa entre redes neuronales

7.1.1. Error ponderado

Como se comentó anteriormente, para determinar la red neuronal más ajustada al modelo del sistema de control se utiliza la fórmula expresada en la Ecuación 1. Los valores obtenidos por las distintas redes neuronales creadas y entrenadas para esta Tesis Doctoral están resumidos en la Tabla 47.

Tipo de red neuronal	Error ponderado
MLP	0.01438681775
RBF	0.013807653
GFF	0.01318772775
TLRN	0.0138686445
MNN	0.01047952575
PCA	0.01346642975
RN	0.0138169685
SOFMN	0.01332724175

Tabla 47. Errores ponderados para cada tipo de red neuronal.

Según el criterio establecido en la Ecuación 1 para valorar la red neuronal que mejor se ajuste al sistema objeto de estudio se ha obtenido que la red neuronal con topología MNN (Modular Neural Network) es la que más se aproxima al comportamiento del sistema.

7.1.2. Sensibilidad de las variables

Teniendo en cuenta el estudio de sensibilidad de la salida frente a las variables de entrada en la Tabla 48 y en la Ilustración 129 se recopilan los resultados para las diferentes redes neuronales entrenadas.

Tipo de red	Text (ºC)	Tint (ºC)	Hext (%)	Hint (%)	Rg (W/m²)
MLP	0.022960454	0.007837492	0.001020798	0.063703725	0.025176415
RBF	0.017225455	1.05367E-09	1.05367E-09	0.03877959	0.030234022
GFF	0.017330325	0.007656328	0	0.062638048	0.035140869
TLRN	0.034643211	0.000969666	0.018066204	0.041054291	0.043257916
MNN	0.017062844	0.006274729	2.7894E-17	0.043687506	0.034983125
PCA	0.016505975	0.005227746	0.020659382	0.038748913	0.038087609
RN	0.027236961	0.008996452	0.001025524	0.036032649	0.026309675
SOFMN	0.026604091	1.04603E-17	1.04603E-17	0.062747142	0.035771657

Tabla 48. Comparativa de la sensibilidad de la salida en función de las variables de entrada para cada red neuronal entrenada.

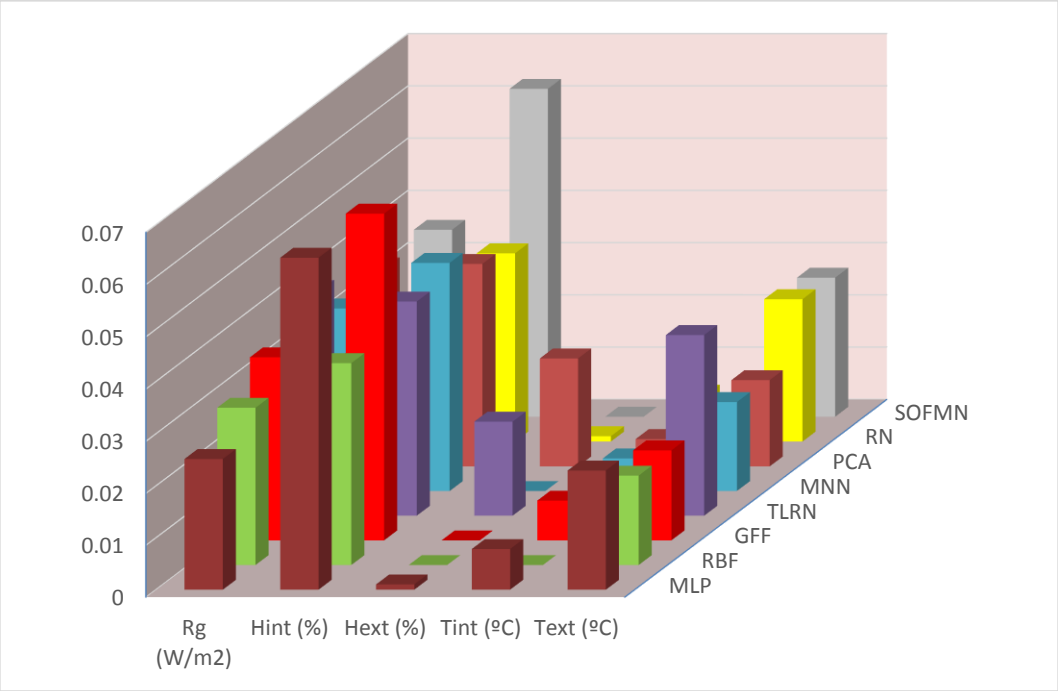


Ilustración 129. Comparativa de la sensibilidad de la salida en función de las variables de entrada para cada red neuronal entrenada.

En la Tabla 48 se han resaltado los valores de máxima sensibilidad para cada red. En todas las redes, excepto en la de topología TLRN, la máxima sensibilidad de la salida es frente a la variable de entrada Humedad interior; y en la citada topología ocupa el segundo valor, siendo

este muy cercano al máximo. La siguiente en importancia es la Radiación global excepto en la red RN que es la Temperatura exterior.

Aunque el esfuerzo energético del sistema de climatización sea debido a la transferencia de calor desde el exterior debida a la temperatura exterior y a la radiación a la que está expuesta la fachada, un valor interno, como es la humedad interior, es la que aparece en la mayoría de los análisis de sensibilidad como la variable que más influencia tienen sobre la energía consumida. Esto es debido a que la actuación del aire acondicionado sobre la estancia provoca una modificación en las condiciones de humedad que son altamente dependientes del esfuerzo del sistema de climatización por mantener la temperatura interna. Así pues, el ambiente pierde humedad a consecuencia de la condensación en las baterías de intercambio de calor de los fancoils; éstos disponen de desagües oportunos. Esta pérdida de humedad ambiental está estrechamente ligada al tiempo de funcionamiento del aire acondicionado.

7.1.3. Ahorro energético

Los ahorros energéticos, expresados en porcentaje, que se obtendrían aplicando las distintas arquitecturas de redes neuronales se representan en la Tabla 49. Aunque en este caso el mayor ahorro energético se obtiene con la red neuronal de topología TLRN (27.8%), la red con topología MNN seleccionada como la más próxima al modelo del sistema tiene un ahorro energético equivalente (19.2%).

Enlazando con la comparativa de sensibilidades, el modelo basado en la red TLRN era el más sensible a la radiación solar (incluso más que a la Humedad interna) y a la Temperatura externa. Se estima que este modelo, en comparación con el resto, no considera las "inercias internas" de la planta en la medida adecuada.

Algo parecido ocurre con la red RN. En este caso su factor más sensible es la Humedad interna, pero es una de las menos sensibles a la misma. El segundo parámetro más sensible es la Temperatura externa, seguido de cerca de la Radiación global.

Tipo de red neuronal	Ahorro energético
MLP	22.9%
RBF	20.4%
GFF	19.1%
TLRN	27.8%
MNN	19.2%
PCA	19.8%
RN	9.3%
SOFMN	20.4%
Media	19.6%
Mediana	20.0%

Tabla 49. Resumen del ahorro energético en porcentaje tras la aplicación de las redes neuronales al año sin control 2012.

Por tanto, haciendo una comparativa conjunta de error y sensibilidad, se puede estimar que el comportamiento de los modelos está condicionado por el grado de equilibrio entre la sensibilidad asociada a los factores internos (destacando la Humedad interna) y los externos (destacando la Radiación solar, que es precisamente sobre la que incide el control).

8. Conclusiones

Gracias al avance imparable de la domótica en las viviendas y, aprovechando un recurso de la misma como son las persianas motorizadas, con la aplicación de un algoritmo de control sobre las mismas y un mínimo de sensores adicionales se puede conseguir un gran ahorro energético durante los meses de verano, en los que la radiación solar provoca un sobrecalentamiento en las estancias si no se regula oportunamente.

Dicho ahorro energético ha podido ser cuantificado gracias a la implementación del algoritmo de control de persianas en una instalación domótica, de control abierto, diseñada como planta piloto. Dicha planta ha permitido implementar un algoritmo "no estándar" en los equipos comerciales.

En una instalación típica domótica, donde es común que las persianas estén motorizadas y haya sensores de temperatura, puede incluirse un algoritmo de control que mediante la adición de un sensor de radiación luminosa externo diga al sistema de control los valores actuales de la incidencia de la radiación solar sobre la vivienda. El algoritmo, que puede ejecutarse en un dispositivo adicional a la instalación domótica, o en la nube si la instalación dispone de conexión a internet y puede subir los datos registrados (temperaturas interior y exterior y radiación solar), puede determinar la actuación sobre las persianas motorizadas para regular la incidencia del sol en las estancias, reduciendo el aporte de calor que, posteriormente, debe compensar el equipo de aire acondicionado.

El coste de esta mejora en el sistema es mínimo, si la instalación ya cuenta con las persianas motorizadas, y si el algoritmo puede programarse en algún dispositivo interno de la instalación domótica o en la nube.

Dado que la conexión de los sistemas domóticos a Internet es un estándar, debería normalizarse la forma de implementar "código

domótico" en la nube, para así poder implementar algoritmos como el propuesto en los sistemas comerciales. La adaptación de los equipos que cuentan con conexión a la red, en muchos casos podría reducirse a una actualización del firmware.

El algoritmo es más eficiente cuando se opera sectorizando por estancias, ya que entre los distintos espacios de una edificación pueden existir diferencias en los parámetros ambientales más significativos.

El ahorro energético es notable y esto se ha comprobado empíricamente tras la recopilación y análisis de los datos de 2 años consecutivos de características similares.

La cuantificación del ahorro energético puede variar ostensiblemente de un año a otro, dependiendo de la evolución de las características climatológicas a lo largo del periodo de estudio.

El algoritmo de control es aplicable a otras instalaciones domóticas siempre y cuando cuente con sensores de temperatura, humedad e iluminación además de conexión a Internet y movimiento de persianas integrados en la instalación domótica.

El ahorro energético tiene una traducción directa en un ahorro económico, si bien la cuantificación de este último dependerá del contrato de energía eléctrica.

Además, se han modelado los consumos energéticos asociados a la instalación "controlada" mediante diferentes arquitecturas de redes neuronales. Posteriormente se han comparado los resultados obtenidos, teniendo en cuenta factores tales como los errores en la predicción y la sensibilidad presentada frente a las variables de entrada.

El modelado del sistema de control objeto de estudio y la aplicación de los modelos a los datos del año sin control, corroboran que se puede obtener un ahorro energético sustancial si se aplica el control sobre la instalación domótica.

En cuanto a la comparación entre los distintos modelos del sistema, ateniéndonos al criterio establecido de minimizar el error ponderado del ajuste de las redes, se ha obtenido que la red neuronal con topología MNN es la que más se acerca al modelo real del sistema.

En cuanto a la sensibilidad de los modelos, los que muestran mejor comportamiento son los más sensibles a la Humedad interna y a la Radiación solar.

Aplicando los modelos, basados en redes neuronales, sobre los datos medidos en la instalación domótica, más los obtenidos por la modelización de las redes neuronales, se puede establecer que la implantación de un algoritmo de control domótico sobre las persianas motorizadas puede conseguir un ahorro energético significativo sobre el consumo del equipo de aire acondicionado en los meses de verano (alrededor de un 20%, para el año estudiado, de acuerdo a la media y la mediana de los valores calculados para los diferentes modelos).

El ahorro energético en los sistemas de refrigeración, tales como el aire acondicionado, tiene una vinculación directa con la reducción de los picos de consumo en los centros de transformación. Y por tanto, implica un incremento en la potencia disponible en las instalaciones de distribución de energía eléctrica. Este hecho es especialmente significativo en las áreas vacacionales.

9. Desarrollos futuros

El objetivo de esta Tesis Doctoral persigue la mejora de la eficiencia energética en instalaciones domóticas tanto de nueva implantación como ya constituidas. El desarrollo domótico creado para esta Tesis Doctoral ha permitido demostrar una vía para incrementar el ahorro pero aún quedan otras vías por las que continuar aprovechando las instalaciones domóticas, permitiendo incrementar aún más el ahorro energético.

La disponibilidad de datos online sobre predicciones meteorológicas presenta una oportunidad para aprovecharlos sobre el control de la climatización, realizando un algoritmo de control que actúe en consecuencia según las predicciones, adelantando acciones para realizar pre enfriamientos que permitan optimizar el rendimiento del equipo de aire acondicionado, así como garantizar el seguimiento de la consigna térmica fijada por el usuario.

Dentro de las posibles mejoras, también puede ser de interés estudiar la gestión de los espacios "no utilizados" como acumuladores de energía térmica, y considerar un control de temperatura de dichos espacios en base a la mejora de la eficiencia del conjunto.

La mejora energética también podría mejorarse gestionando la ventilación e introducción de aire frío desde el exterior; utilizando dicha refrigeración como un sistema complementario al del propio aire acondicionado.

De otro lado, la implementación del control desde la nube permitiría aplicar los modelos de las instalaciones existentes a otras futuras (con características constructivas y climatológicas similares), sin necesidad a generar una base de datos meteorológico-energética para la puesta en marcha.

Otra vía de ampliación de esta Tesis Doctoral se centra en la introducción, dentro de los modelos, de variables asociadas a espacios

frontera (tales como espacios y/o edificaciones que comparten una "frontera").

Siguiendo con la generación y mejora de los modelos, debería considerarse el desarrollo de modelos en base a otras técnicas de inteligencia artificial.

No menos interesante puede ser reducir la escala temporal de los modelos y generar predicciones del orden de los minutos. El mayor problema es que, en primer lugar, se debería generar la base de datos que permitiese validar los trabajos y las mejoras con respecto a los actuales.

Otra línea de investigación es la generación de control y modelado de planta en los "periodos de frío". Para ello, sería aconsejable contar con una planta de ensayos que permita conjugar la utilización de varios sistemas de calefacción, de modo que incluso se seleccione el uso de aquéllos que se muestren más eficientes en cada momento (en función de saltos térmicos, etc.).

Por otro lado, la aparición del mercado libre de la energía eléctrica y los contadores digitales en las viviendas lleva a los usuarios a un panorama en el que la energía tendrá un coste derivado del momento en el que se consuma donde, además, las franjas horarias pico y valle no serán fijas. Los algoritmos de previsión del coste de la misma según la franja horaria y la actuación de los sistemas de climatización, incorporando a su vez las previsiones meteorológicas, permitirían un incremento mayor del ahorro, en este caso, económico, que no siempre energético.

10. Referencias bibliográficas

Al-Ali, A., El-Hag, A., Bahadiri, M., Harbaji, M., & Haj, Y. A. (2011). Smart Home Renewable Energy Management System . *Energy Procedia , 12*(0), 120-126. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211018431

Athienitis, A., & Tzempelikos, A. (2002). A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device . *Solar Energy , 72*(4), 271-281. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X02000166

Auda, G., & Kamel, M. (1998). Modular Neural Network Classifiers: A Comparative Study. *Journal of Intelligent and Robotic Systems, 21*(2), 117-129. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1007925203918

B4A. Anywhere Software. (s.f.). Obtenido de http://www.basic4ppc.com

Bălan, R., Cooper, J., Chao, K.-M., Stan, S., & Donca, R. (2011). Parameter identification and model based predictive control of temperature inside a house. *Energy and Buildings, 43*(2â€“3), 748-758. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810003750

Baldinelli, G. (2009). Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment, 44*(6), 1107-1118. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132308001935

Batista, N., Melício, R., Matias, J., & Catalão, J. (2013). Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy

management using ZigBee devices within a smart grid. *Energy, 49*(0), 306-315. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212008390

Bessoudo, M., Tzempelikos, A., Athienitis, A., & Zmeureanu, R. (2010). Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices â€“ Part I: Experiments and building thermal model . *Building and Environment , 45*(11), 2506-2516. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310001514

BOE. (11 de marzo de 2011). Obtenido de Boletín Oficial del Estado: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-5834

Bouzerdoum, A., & Mueller, R. (2003). A Generalized Feedforward Neural Network Architecture and Its Training Using Two Stochastic Search Methods. En E. CantÃº-Paz, J. Foster, K. Deb, L. Davis, R. Roy, U.-M. Oâ€™Reilly, . . . J. Miller (Edits.), *Genetic and Evolutionary Computation â€" GECCO 2003* (Vol. 2723, págs. 742-753). Springer Berlin Heidelberg. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1007/3-540-45105-6_89

Breitenbach, J., Lart, S., Längle, I., & Rosenfeld, J. (2001). Optical and thermal performance of glazing with integral venetian blinds. *Energy and Buildings, 33*(5), 433-442. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880000102X

Buoro, D., Casisi, M., Pinamonti, P., & Reini, M. (2012). Optimal synthesis and operation of advanced energy supply systems for standard and domotic home . *Energy Conversion and Management , 60*(0), 96-105. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412000623

C. Filippín, S. F. (2010). Winter energy behaviour in multi-family block buildings in atemperate-cold climate in Argentina.

CEDOM. Asociación española de domótica e inmótica. (s.f.). Obtenido de http://www.cedom.es

Chan, M., Campo, E., Estève, D., & Fourniols, J.-Y. (2009). Smart homes -- Current features and future perspectives. *Maturitas, 64*(2), 90-97. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378512209002606

Chen, Y., Li, H., & Chen, X. (Dec de 2009). Venetian Blind Control System Based on Fuzzy Neural Network for Indoor Daylighting. *Computer and Electrical Engineering, 2009. ICCEE '09. Second International Conference on*, *2*, págs. 269-273.

Cook, D. J., & Das, S. K. (#mar# de 2007). How Smart Are Our Environments? An Updated Look at the State of the Art. *Pervasive Mob. Comput., 3*(2), 53-73. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1016/j.pmcj.2006.12.001

Cook, D. J., Augusto, J. C., & Jakkula, V. R. (2009). Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities . *Pervasive and Mobile Computing , 5*(4), 277-298. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119209000025X

Cortes, F., Rubio, E., & Valdovinos, A. (Nov de 2002). Embedded powerline DSP modem for domotic SNMP networking in European countries. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 48*(4), 854-862.

CTE. Código Técnico de la Edificación. (s.f.). Obtenido de http://www.codigotecnico.org

David, M., Donn, M., Garde, F., & Lenoir, A. (2011). Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades . *Building and Environment , 46*(7), 1489-1496. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311000321

De Silva, L. C., Morikawa, C., & Petra, I. M. (#oct# de 2012). State of the Art of Smart Homes. *Eng. Appl. Artif. Intell., 25*(7), 1313-1321. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2012.05.002

Digi International Inc. (s.f.). Obtenido de http://www.digi.com/

Ding, D., Cooper, R. A., Pasquina, P. F., & Fici-Pasquina, L. (2011). Sensor technology for smart homes. *Maturitas, 69*(2), 131-136. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378512211000983

DOMOTYS. Internacionalización e Innovación de las empresas españolas de Domótica e Inmótica. (s.f.). Obtenido de http://www.domotys.org

Dong, D., & McAvoy, T. (1996). Nonlinear principal component analysisâ€"Based on principal curves and neural networks . *Computers & Chemical Engineering , 20*(1), 65-78. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/009813549500003K

Dounis, A., & Caraiscos, C. (2009). Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review. *13*, 1246–1261.

Dounisa, A., P.Tiropanisb, A.Argiriouc, & A.Diamantis. (2010). Intelligent control system for reconciliation of the energy savings with comfort in buildings using soft computing techniques.

Feng, G., Zhang, Q., Sha, S., & Wang, Z. (2014). The Energy Consumption Analysis for the Windows with External Shading Influenced on the Green Building. En A. Li, Y. Zhu, & Y. Li (Edits.), *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning* (Vol. 263, págs. 515-521). Springer Berlin Heidelberg. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-39578-9_54

Foster, M., & Oreszczyn, T. (2001). Occupant control of passive systems: the use of Venetian blinds . *Building and Environment , 36*(2), 149-155. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132399000748

Future Technology Devices International Ltd, FTDI Chip. (s.f.). Obtenido de http://www.ftdichip.com/

González, J., & Hernando, V. (1995). *Redes neuronales artificiales: fundamentos, modelos y aplicaciones.* RA-MA. Obtenido de http://books.google.es/books?id=SMjHOwAACAAJ

Gratia, E., & Herde, A. D. (2007). The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. *Energy and Buildings, 39*(3), 364-373. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806002106

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (#sep# de 2013). Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Future Gener. Comput. Syst., 29*(7), 1645-1660. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010

Gugliermetti, F., & Bisegna, F. (2006). Daylighting with external shading devices: design and simulation algorithms . *Building and Environment , 41*(2), 136-149. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304003804

Guillemin, A., & Molteni, S. (2002). An energy-efficient controller for shading devices self-adapting to the user wishes . *Building and Environment , 37*(11), 1091-1097. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132301001135

Hu, J., & Olbina, S. (2011). Illuminance-based slat angle selection model for automated control of split blinds . *Building and Environment , 46*(3), 786-796. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310003057

Hviid, C. A., Nielsen, T. R., & Svendsen, S. (2008). Simple tool to evaluate the impact of daylight on building energy consumption . *Solar Energy , 82*(9), 787-798. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08000492

Ichi Funahashi, K., & Nakamura, Y. (1993). Approximation of dynamical systems by continuous time recurrent neural networks. *Neural Networks, 6*(6), 801-806. Obtenido de

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089360800580125X

IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (s.f.). Obtenido de http://www.idae.es

Ippolito, M., Sanseverino, E. R., & Zizzo, G. (2014). Impact of building automation control systems and technical building management systems on the energy performance class of residential buildings: An Italian case study . *Energy and Buildings , 69*(0), 33-40. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813006713

ITIF. (s.f.). Obtenido de The Information Technology & Innovation Foundation: http://www.itif.org/publications/internet-things

Kang, S. J., Park, J., Oh, K.-Y., Noh, J. G., & Park, H. (2014). Scheduling-based real time energy flow control strategy for building energy management system . *Energy and Buildings , 75*(0), 239-248. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814001194

Kapur, N. K. (2004). A comparative analysis of the radiant effect of external sunshades on glass surface temperatures . *Solar Energy , 77*(4), 407-419. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03003827

Karhunen, J., & Joutsensalo, J. (1995). Generalizations of principal component analysis, optimization problems, and neural networks . *Neural Networks , 8*(4), 549-562. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0893608094000987

Kaygusuz, A., Keles, C., Alagoz, B. B., & Karabiber, A. (2013). Renewable energy integration for smart sites . *Energy and Buildings , 64*(0), 456-462. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813003174

Keyson, D. V., Mahmud, A. A., de Hoogh, M., & Luxen, R. (2013). Designing a Portable and Low Cost Home Energy Management Toolkit . *Procedia Computer Science , 19*(0), 646-653. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050913006947

Kohonen, T. (Sep de 1990). The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE, 78*(9), 1464-1480.

Koo, S. Y., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2010). Automated blind control to maximize the benefits of daylight in buildings . *Building and Environment , 45*(6), 1508-1520. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231000003X

Kuhn, T. E. (2006). Solar control: A general evaluation method for facades with venetian blinds or other solar control systems . *Energy and Buildings , 38*(6), 648-660. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805002082

Kuhn, T. E., Bühler, C., & Platzer, W. J. (2001). Evaluation of overheating protection with sun-shading systems. *Solar Energy, 69, Supplement 6*(0), 59-74. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X01000172

Kulkarni, S. G., Chaudhary, A. K., Nandi, S., Tambe, S. S., & Kulkarni, B. D. (2004). Modeling and monitoring of batch processes using principal component analysis (PCA) assisted generalized regression neural networks (GRNN) . *Biochemical Engineering Journal , 18*(3), 193-210. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X03002213

Kun-kun DU, liang WANG, Z., & HONG, M. (2013). Human machine interactive system on smart home of IoT. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 20, Supplement 1*(0), 96-99. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005888513602040X

Lehar, M., & Glicksman, L. (2007). Rapid algorithm for modeling daylight distributions in office buildings . *Building and Environment , 42*(8), 2908-2919. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305000673

Li, B., & Yu, J. (2011). Research and Application on the Smart Home Based on Component Technologies and Internet of Things . *Procedia Engineering , 15*(0), 2087-2092. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811018911

Lippmann, R. (Apr de 1987). An introduction to computing with neural nets. *ASSP Magazine, IEEE, 4*(2), 4-22.

Marie Chan, E. C.-Y. (20 de octubre de 2009). Smart homes: Current features and future perspectives. *Maturitas*(ISSN 0378-5122), 90-97.

Maxim Integrated. (s.f.). Obtenido de http://www.maximintegrated.com/en.html

Microchip Technology Inc. (s.f.). Obtenido de http://www.microchip.com/

Microsoft. (s.f.). Obtenido de http://www.microsoft.com/

Ministerio de Industria, Energía y Turismo. (s.f.). Obtenido de http://www.minetur.gob.es/es-ES/Paginas/index.aspx

Missaoui, R., Joumaa, H., Ploix, S., & Bacha, S. (2014). Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System . *Energy and Buildings , 71*(0), 155-167. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813008335

Neural Network Software. (s.f.). Obtenido de http://www.neurosolutions.com/

O'Brien, W., Kapsis, K., & Athienitis, A. K. (2013). Manually-operated window shade patterns in office buildings: A critical review . *Building and Environment , 60*(0), 319-338. Obtenido de

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132312002685

Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C. N., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., . . . Morari, M. (2012). Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control . *Energy and Buildings , 45*(0), 15-27. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811004105

Omer, A. M. (2006). Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(12), 1562–1587.

Orosa, J. A., & C.Oliveira, A. (2008). Energy saving with passive climate control methods in Spanish office buildings. (41), 823-828.

Orr, M. J., & others. (1996). Introduction to radial basis function networks. *Introduction to radial basis function networks*. Technical Report, Center for Cognitive Science, University of Edinburgh.

Park, B.-C., Choi, A.-S., Jeong, J.-W., & Lee, E. S. (03/2011 de 2011). Performance of Integrated Systems of Automated Roller Shade Systems and Daylight Responsive Dimming Systems. *Building and Environment, 46*, 747-757. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.007

Park, K.-W., & Athienitis, A. K. (2003). Workplane illuminance prediction method for daylighting control systems . *Solar Energy , 75*(4), 277-284. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03003013

Pfrommer, P., Lomas, K., & Kupke, C. (1996). Solar radiation transport through slat-type blinds: A new model and its application for thermal simulation of buildings . *Solar Energy , 57*(2), 77-91. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X96000631

Phuangpornpitak, N., & Tia, S. (2013). Opportunities and Challenges of Integrating Renewable Energy in Smart Grid System . *Energy Procedia , 34*(0), 282-290. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213009995

Rea, M. (1984). Window blind occlusion: a pilot study . *Building and Environment , 19*(2), 133-137. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360132384900386

Real Academia Española. (2001). Obtenido de Diccionario de la lengua española: http://www.rae.es/

Reinhart, C. F. (2004). Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds . *Solar Energy , 77*(1), 15-28. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04000702

Rey Martínez, F. J., & Velasco Gómez, E. (2006). *Eficiencia energética en edificios. Certificación y auditorías energéticas.* Thomson Paraninfo.

Sensirion, The Sensor Company. (s.f.). Obtenido de http://www.sensirion.com/

Shaikh, P. H., Nor, N. B., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., & Ibrahim, T. (2014). A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings . *Renewable and Sustainable Energy Reviews , 34*(0), 409-429. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001889

Shaikh, P. H., Nor, N. M., Nallagownden, P., & Elamvazuthi, I. (2013). Intelligent Optimized Control System for Energy and Comfort Management in Efficient and Sustainable Buildings . *Procedia Technology , 11*(0), 99-106. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313003216

Shen, H., & Tzempelikos, A. (2012). Daylighting and energy analysis of private offices with automated interior roller shades . *Solar Energy , 86*(2), 681-704. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11004270

Simmler, H., & Binder, B. (2008). Experimental and numerical determination of the total solar energy transmittance of glazing with venetian blind shading . *Building and Environment , 43*(2), 197-204. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003003

Stavrakakis, G., Zervas, P., Sarimveis, H., & Markatos, N. (2010). Development of a computational tool to quantify architectural-design effects on thermal comfort in naturally ventilated rural houses. (45), 65-80.

Sun, P., & Marko, K. (May de 1998). Optimal Learning Rate For Training Time Lagged Recurrent Neural Networks With The Extended Kalman Filter Algorithm. *Neural Networks Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence. The 1998 IEEE International Joint Conference on*, *2*, págs. 1287-1292.

Suryadevara, N., Mukhopadhyay, S., Wang, R., & Rayudu, R. (2013). Forecasting the behavior of an elderly using wireless sensors data in a smart home . *Engineering Applications of Artificial Intelligence , 26*(10), 2641-2652. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197613001553

Sutter, Y., Dumortier, D., & Fontoynont, M. (2006). The use of shading systems in \{VDU\} task offices: A pilot study . *Energy and Buildings , 38*(7), 780-789. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806000582

Tabares, H., Branch, J. B., & Valencia, J. (2006). Generación dinámica de la topología de una red neuronal artificial del tipo perceptron multicapa. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de*

Antioquia(38), 146-162. Obtenido de http://www.redalyc.org/pdf/430/43003814.pdf

Teich, T., Roessler, F., Kretz, D., & Franke, S. (2014). Design of a Prototype Neural Network for Smart Homes and Energy Efficiency . *Procedia Engineering , 69*(0), 603-608. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814002781

Tzempelikos, A. (2008). The impact of venetian blind geometry and tilt angle on view, direct light transmission and interior illuminance . *Solar Energy , 82*(12), 1172-1191. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08001345

Tzempelikos, A., & Athienitis, A. K. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand . *Solar Energy , 81*(3), 369-382. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X06001897

Tzikopoulos, A., Karatza, M., & Paravantis, J. (2005). Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings. (37), 529–544.

Wymelenberg, K. V. (2012). Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review . *Energy and Buildings , 51*(0), 165-176. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812002630

X10: Performance and Productivity at Scale. (s.f.). Obtenido de http://x10-lang.org/

Yang, R., & Wang, L. (2013). Multi-zone building energy management using intelligent control and optimization . *Sustainable Cities and Society , 6*(0), 16-21. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670712000480

Yao, J. (2014). An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements . *Building and Environment , 71*(0), 24-32. Obtenido de

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313002758

Yao, J. (2014). Determining the energy performance of manually controlled solar shades: A stochastic model based co-simulation analysis . *Applied Energy , 127*(0), 64-80. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914003997

Zamora-Izquierdo, M., Santa, J., & Gómez-Skarmeta, A. (October de 2010). An Integral and Networked Home Automation Solution for Indoor Ambient Intelligence. *Pervasive Computing, IEEE, 9*(4), 66-77.

Zamora-Martínez, F., Romeu, P., Botella-Rocamora, P., & Pardo, J. (2014). On-line learning of indoor temperature forecasting models towards energy efficiency. *Energy and Buildings*(0), -. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814003569

Zhang, S., & Birru, D. (2012). An open-loop venetian blind control to avoid direct sunlight and enhance daylight utilization . *Solar Energy , 86*(3), 860-866. Obtenido de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11004567

11. Nomenclatura

D

domótica ... 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 18, 20, 22, 23, 24, 25, 29, 32, 71, 84, 110, 152, 173

F

fancoils 43, 211, 220, 229

G

GFF
Generalized FeedForward 86

H

HVAC
Heating, Ventilation and Air Conditioning 23

I

inmótica 5
IoT
Internet of Things 6

M

MLP
Multilayer Perceptron 58
MNN
Modular Neural Network 112

P

PCA
Principal Component Analysis 126

R

RBF
Radial Basis Function 73
RN
Recurrent Network 140

S

Smart Grid 22
Smart Home 7
SOFMN
Self-Organizing Feature Map Network154

T

TLRN
Time-Lag Recurrent Network 99

12. ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

12.1. Especificaciones técnicas de la instalación domótica

12.1.1. Tarjetas domóticas

12.1.1.1. Tarjetas base

Las tarjetas base contienen el elemento de control para gestionar 8 entradas digitales, 8 salidas digitales y 4 entradas analógicas además de la conexión al bus RS485.

El cerebro de las tarjetas base está realizado mediante un microcontrolador PIC18F2520 (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.3.1, página 234) de la casa Microchip (Microchip Technology Inc., s.f.). Este microcontrolador funcionando mediante un reloj interno a 8 MHz permite en un mínimo espacio concentrar todas las entradas y salidas sin la adición de componentes externos excepto el transceptor para el bus.

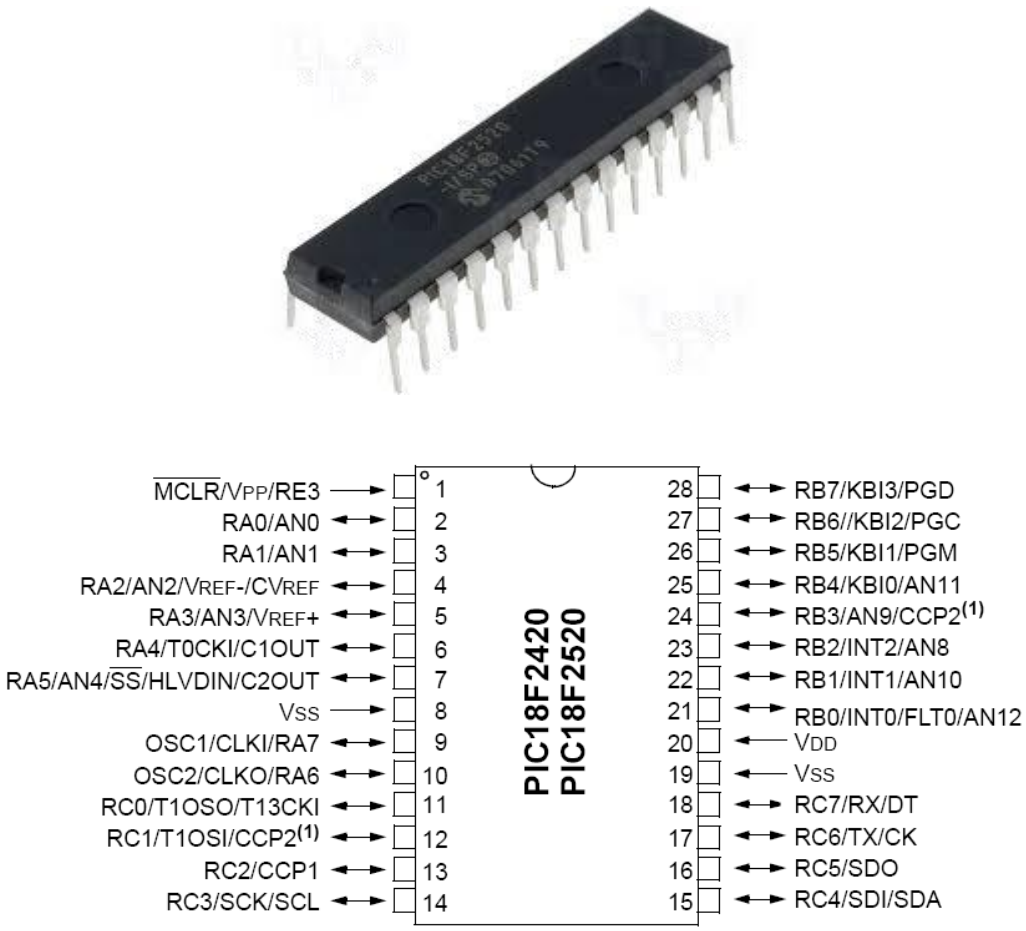


Ilustración 130. Microcontrolador PIC18F2520: Encapsulado y distribución de pines.

El acceso al bus RS485 está basado en el circuito integrado MAX13088E (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.3.2, página 241) de la casa Maxim (Maxim Integrated, s.f.) que permite hasta 256 elementos en el bus.

En la Ilustración 131 y en la Ilustración 132 se puede ver la distribución de las tarjetas domóticas en la instalación de la planta baja y de la planta primera respectivamente.

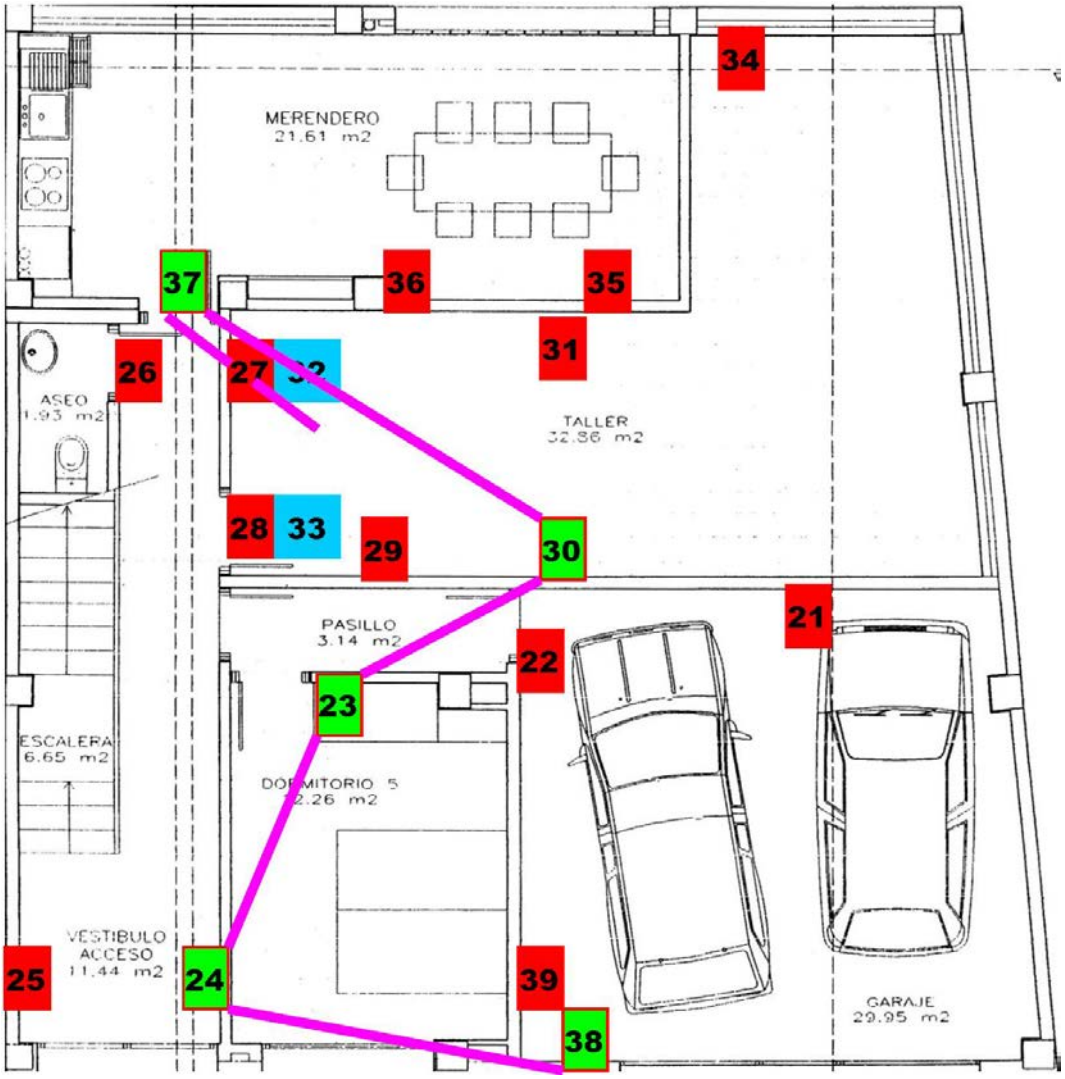


Ilustración 131. Localización de cajas de registro en planta baja. En fondo verde las que contienen tarjetas domóticas y su interconexión en el bus.

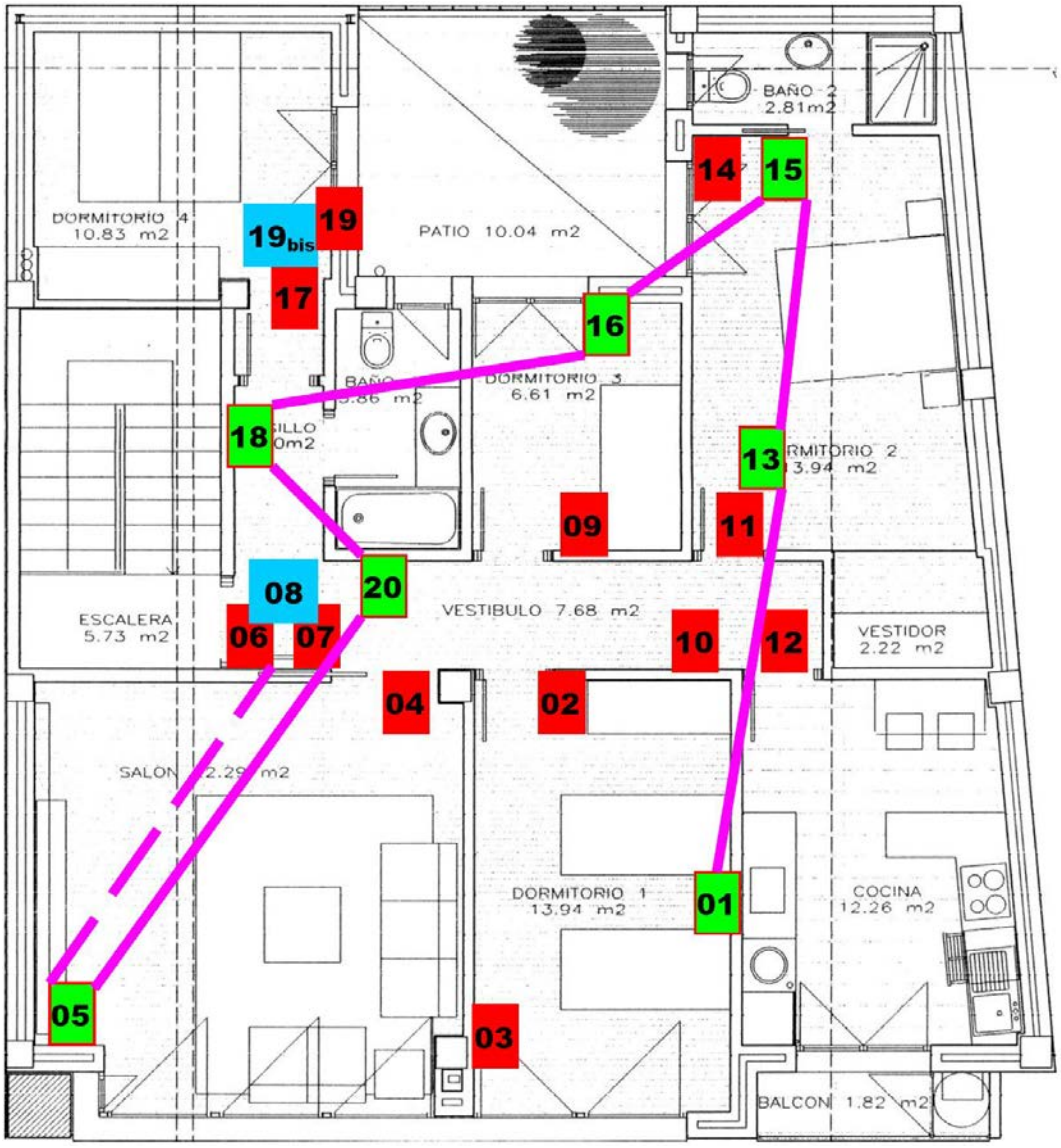


Ilustración 132. Localización de cajas de registro en planta primera. En fondo verde las que contienen tarjetas domóticas y su interconexión en el bus.

Cada tarjeta base concentra en ella los elementos de entrada y salida más próximos a su ubicación para minimizar el cableado.

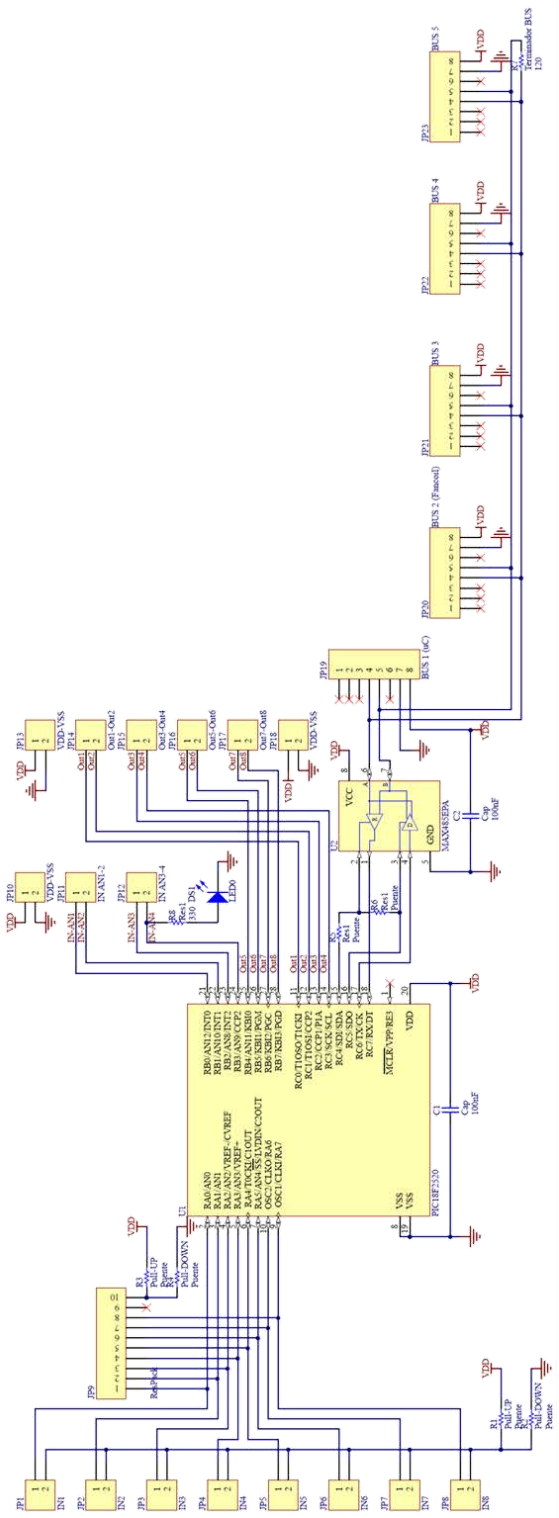


Ilustración 133. Tarjeta domótica: Esquema placa base.

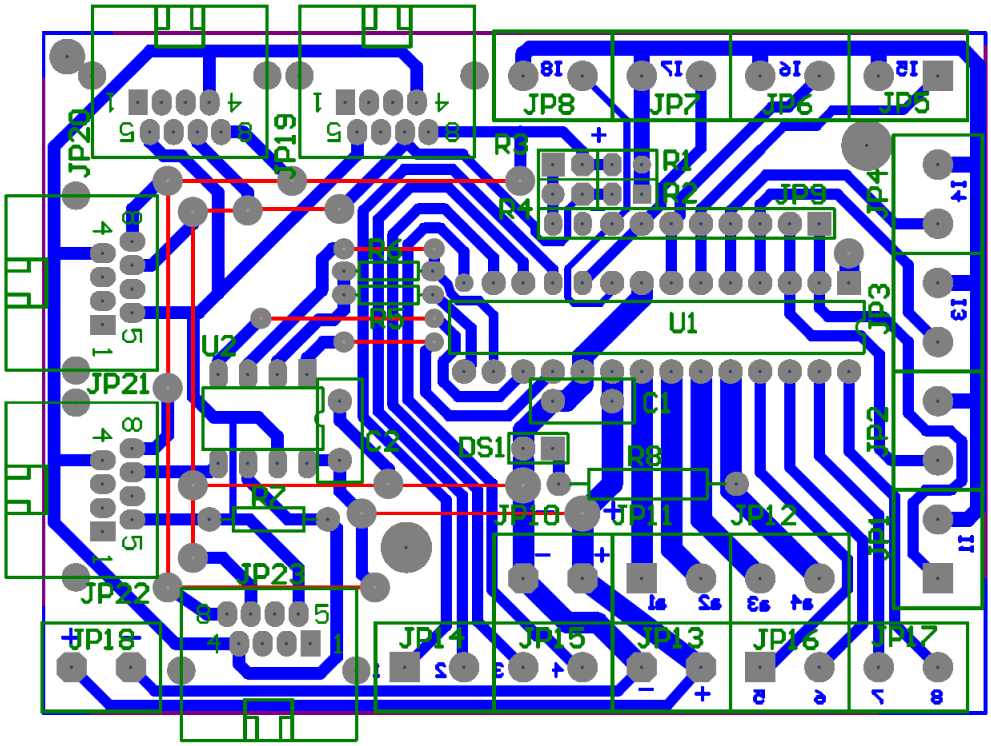


Ilustración 134. Tarjeta domótica: PCB placa base.

El bus físico está formado por cable de par trenzado en el que se utilizan 2 pares: Uno para la transmisión de datos a velocidad de 19200 baudios y otro para la alimentación de las tarjetas con 5V de corriente continua. La conexión de las tarjetas al bus se realiza con conectores RJ45 y la distribución de cables es según la norma EIA-TIA 568B (Ilustración 135).

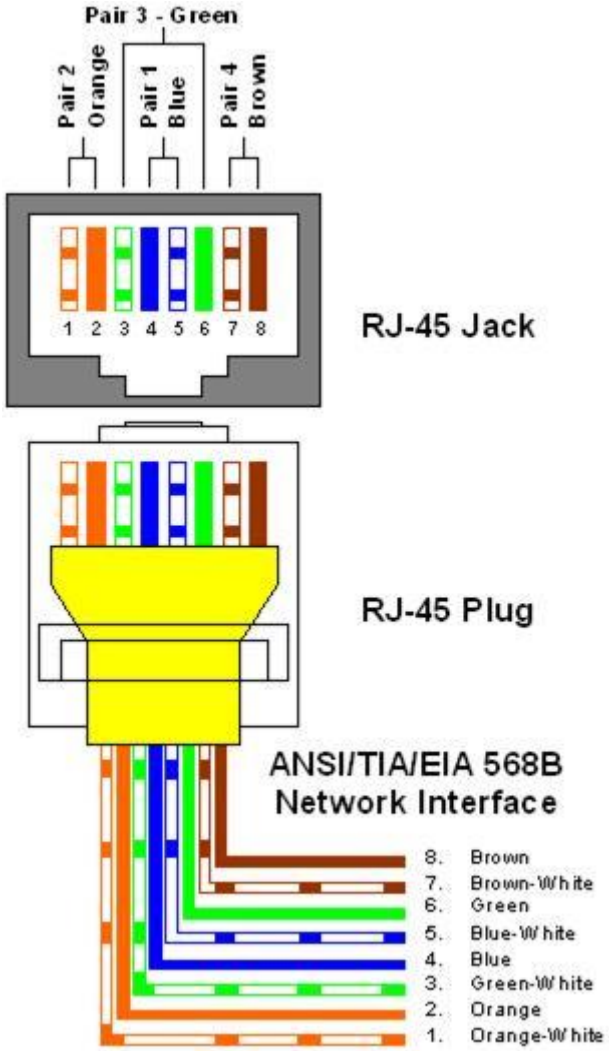


Ilustración 135. Conexión del cableado del bus y los conectores RJ-45.

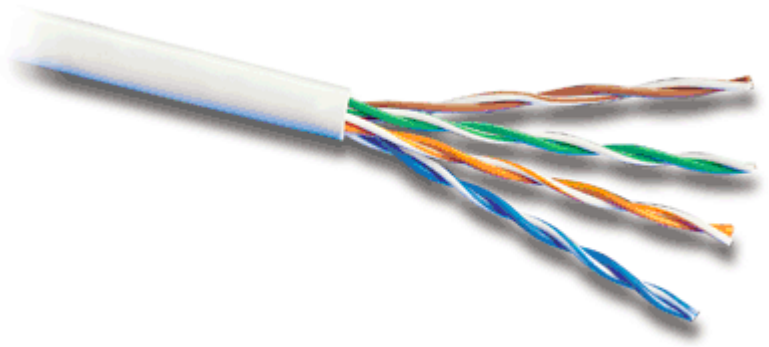


Ilustración 136. Cable de par trenzado utilizado para el bus.

La activación local por parte del usuario se realiza mediante pulsadores normalmente abiertos que van conectados directamente a las tarjetas base. De cara al mantenimiento y a la seguridad la tensión presente en los pulsadores es de tan sólo de 5V.

12.1.1.2. Tarjetas de actuadores

Los sistemas de actuadores van unidos a las salidas digitales de las tarjetas base y son de 2 tipos:

- Actuadores con salida a triac.
- Actuadores con salida a relé.

Ambos sistemas de activación de cargas para corriente alterna están aislados de la red para proporcionar seguridad al sistema. Las salidas a triac utilizan optotriacs de cruce por cero MOC3041 (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.3.3, página 247) que además de garantizar el aislamiento eléctrico realizan la conexión de la carga en los pasos por cero de la señal alterna senoidal, consiguiendo evitar armónicos indeseados en la instalación en los momentos de activación. También el uso de estos dispositivos con cruce por cero garantizan una mayor vida de los elementos de iluminación, sobre todo en las lámparas incandescentes, ya que se evita una posible sobre-corriente en el encendido de las mismas, y esta sobre-corriente es una de las principales causas de fundido.

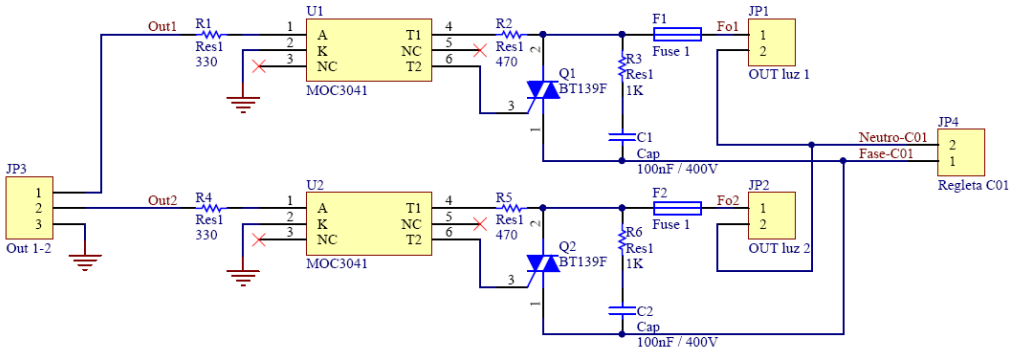


Ilustración 137. Tarjeta domótica: Esquema módulo de 2 salidas de activación por optotriac.

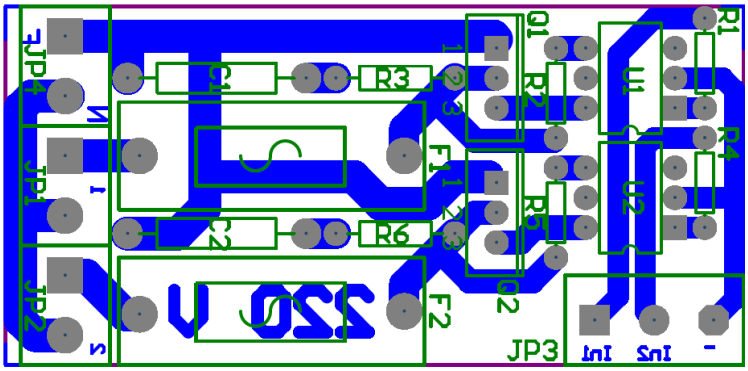


Ilustración 138. Tarjeta domótica: PCB módulo de 2 salidas de activación por optotriac.

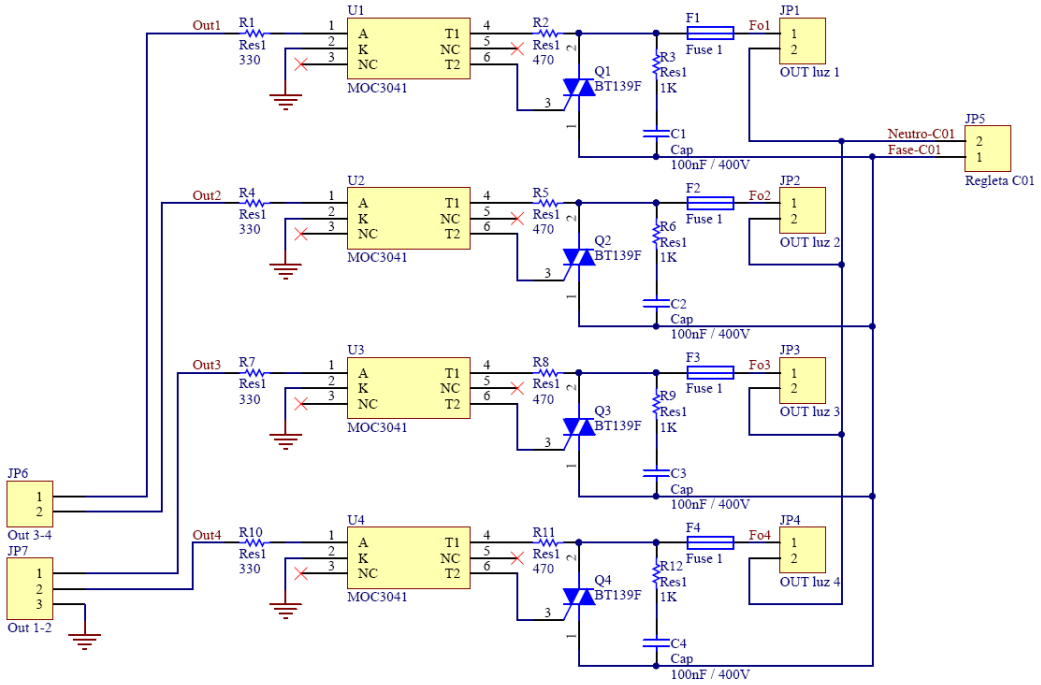


Ilustración 139. Tarjeta domótica: Esquema módulo de 4 salidas de activación por optotriac.

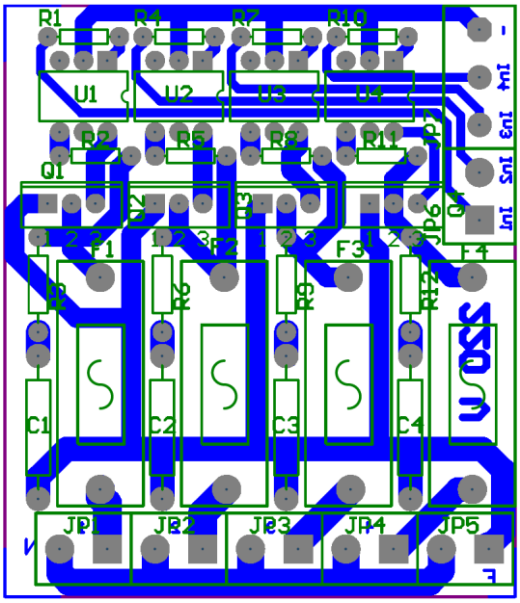


Ilustración 140. Tarjeta domótica: PCB módulo de 4 salidas de activación por optotriac.

Para las cargas muy inductivas se utilizan los módulos de salidas a relé. Se han creado dos tipos de módulos diferentes de salida a relé. Uno de ellos simplemente permite la activación de 2 cargas totalmente independientes y está destinado para el uso general. El otro módulo de relés está específicamente diseñado para el uso en persianas.

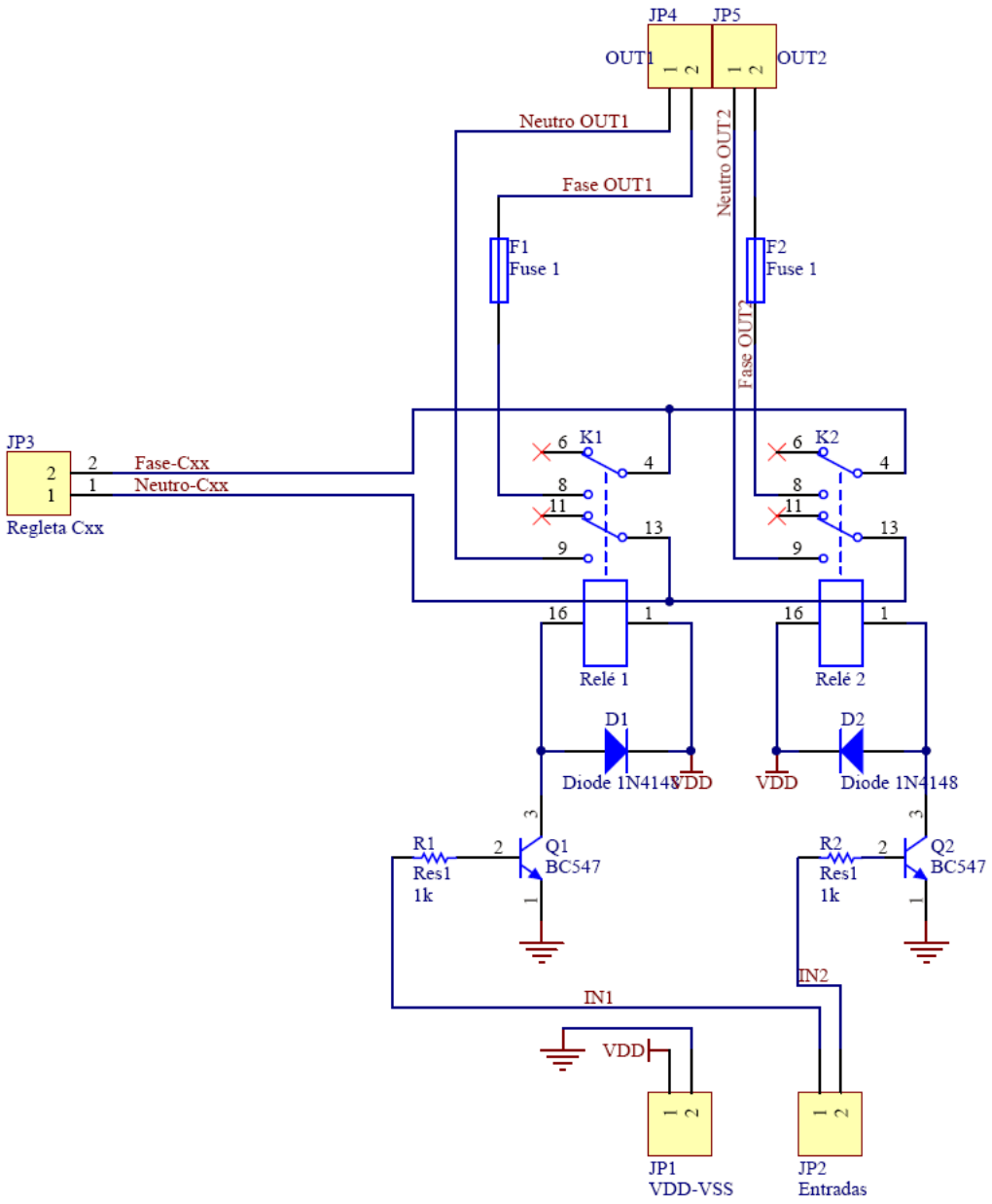


Ilustración 141. Tarjeta domótica: Esquema módulo de 2 salidas con activación por relé.

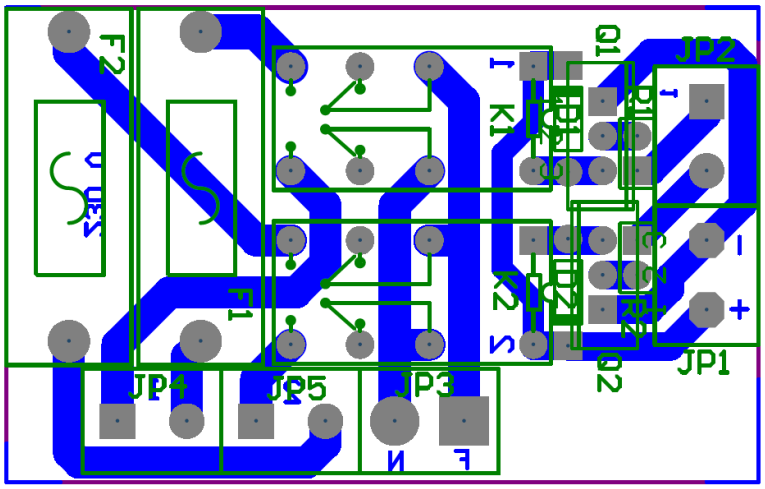


Ilustración 142. Tarjeta domótica: PCB módulo de 2 salidas con activación por relé.

Los motores que actúan sobre las persianas constan de 2 bobinados, uno para subir y otro para bajar. El cableado disponible es un neutro común a ambos bobinados y 2 fases, una para cada movimiento. En ningún momento deben activarse simultáneamente ambas fases. Para evitar una actuación indebida los módulos a relés para la activación de persianas incorporan esta protección que impide la activación de ambos relés simultáneamente.

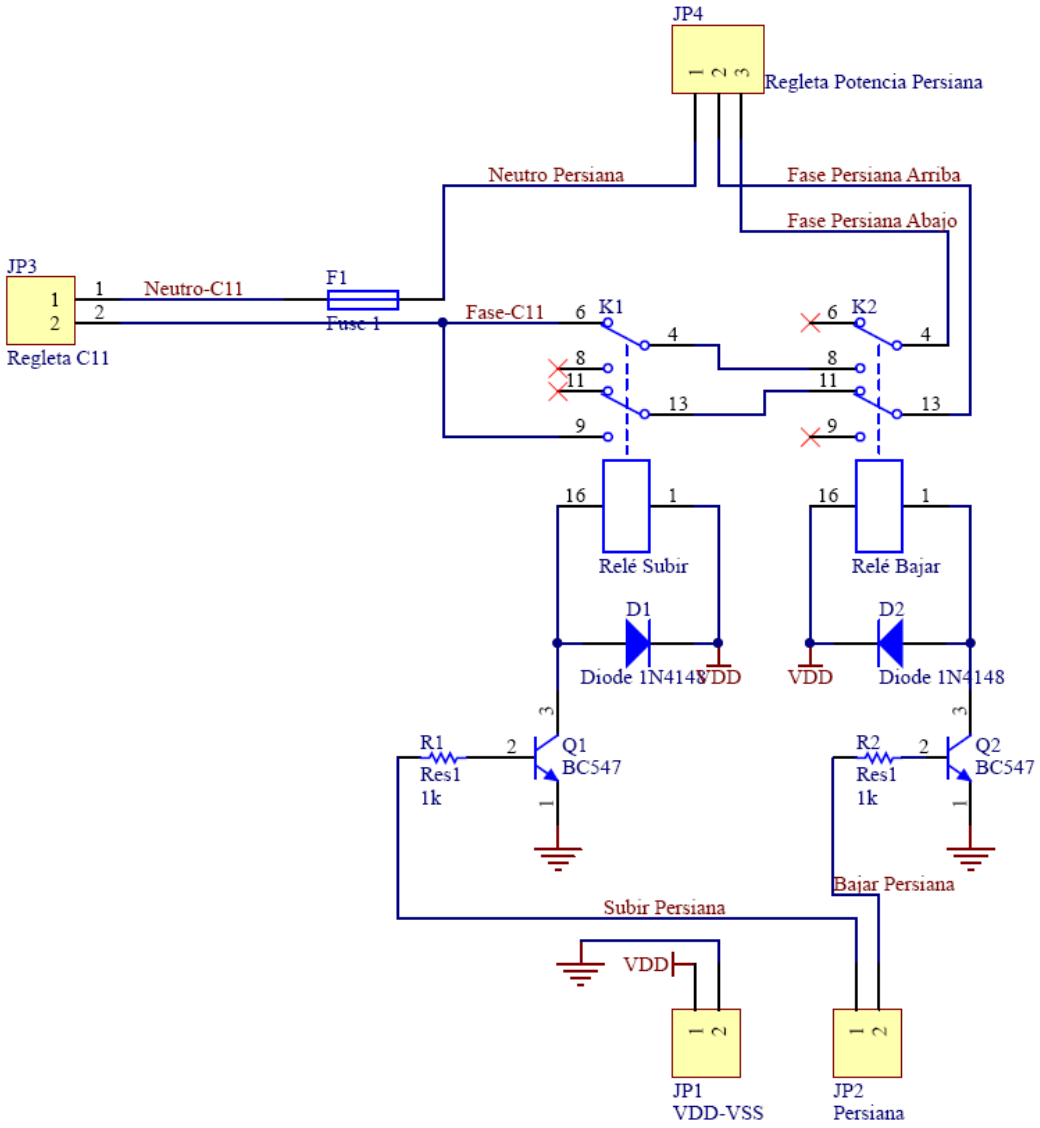


Ilustración 143. Tarjeta domótica: Esquema módulo de salida de persiana con activación por relé.

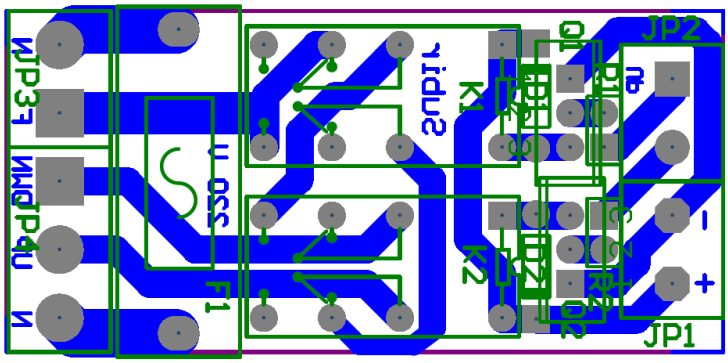


Ilustración 144. Tarjeta domótica: PCB módulo de salida de persiana con activación por relé.

12.1.2. Sensores

12.1.2.1. Sensores de temperatura y humedad

La combinación de medidas de temperatura y humedad relativa nos lleva a seleccionar un sensor doble digital integrado como el SHT21 (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.3.6, página 257) de la casa Sensirion (Sensirion, The Sensor Company, s.f.).

Ilustración 145. Sensor digital integrado doble de temperatura y humedad.

Este sensor de bajo consumo y salida totalmente digital con interface I^2C se integra en el sistema domótico para ofrecer sus datos en el bus.

12.1.2.2. Sensor de iluminación

Para determinar el nivel de iluminación interior se emplea el circuito integrado BH1750FVI (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.3.5, página 250) que es un sensor de iluminación con salida digital que proporciona el valor en lux de la iluminación recibida.

Ilustración 146. Sensor de iluminación BH1750FVI.

12.1.2.3. Sensor de consumo eléctrico

Para el análisis de los datos se necesita la incorporación de un sensor de consumo eléctrico que nos permite determinar la energía eléctrica consumida por el sistema de climatización. El dispositivo seleccionado es el OWL+USB de la casa OWL (intelligent wireles energy monitoring and control) (http://theowl.com/index.php/energy-monitors/standalone-monitors/owl-usb/) que monitoriza constantemente el consumo energético del equipo de aire acondicionado (enfriadora más fancoils) registrando la energía consumida en kWh en intervalos de 1 hora.

Ilustración 147. Medidor de energía eléctrica.

12.1.2.4. Sensores de presencia

Los sensores han sido adaptados para su conexión a las tarjetas base garantizando el aislamiento con las entradas de éstas. En este caso se han sustituido los relés de activación con los que van dotados por optoacopladores PC817 (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.3.4, página 250).

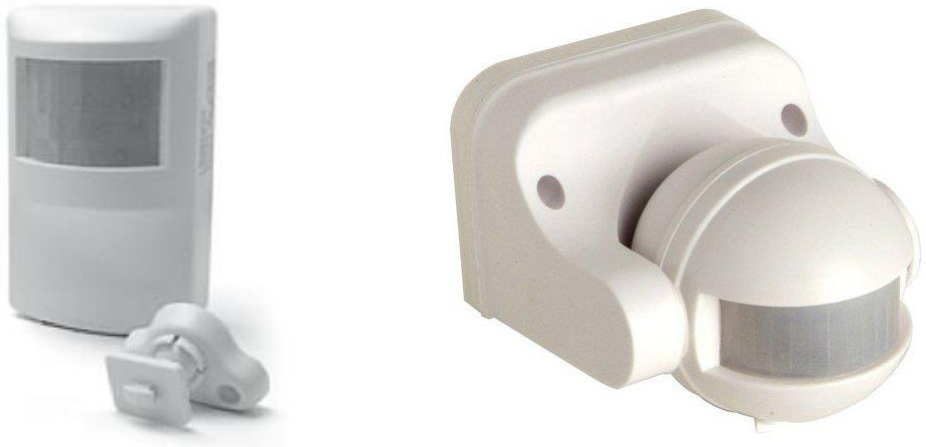


Ilustración 148. Detectores de presencia empleados.

12.1.3. Interface con el sistema domótico

Ya que el bus está constituido sobre el protocolo RS485, se ha desarrollado un interface USB que permite conectar un PC con el bus. El hardware empleado para esta pasarela ha sido el módulo DLP-USB232M (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.3.7, página 261) de la casa FTDI Chip (Future Technology Devices International Ltd, FTDI Chip, s.f.), que permite la comunicación en modo puerto serie virtual entre el PC a través de USB y un dispositivo serie TTL, más el driver MAX18088E (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado Transceptor RS485 MAX13088E, página 241) de la casa Maxim (Maxim Integrated, s.f.) para la adaptación de los niveles TTL a los niveles diferenciales del bus RS485. Esta pasarela está perfectamente optoaislada para evitar cualquier problema entre el PC y las tarjetas domóticas.

Con esta pasarela USB a RS485 cualquier PC puede conectarse a la instalación domótica y convertirse en monitor y controlador de la instalación pudiendo estar presente más de un PC simultáneamente.

El software de monitorización y control domótico para PC se ha desarrollado en el lenguaje Visual Basic .NET (Microsoft, s.f.). Al ejecutarse el software se establece una comunicación bidireccional con el

bus domótico permitiendo el envío de comandos a través de mismo así como la recepción de los generados por las tarjetas o por cualquier otro equipo conectado al bus.

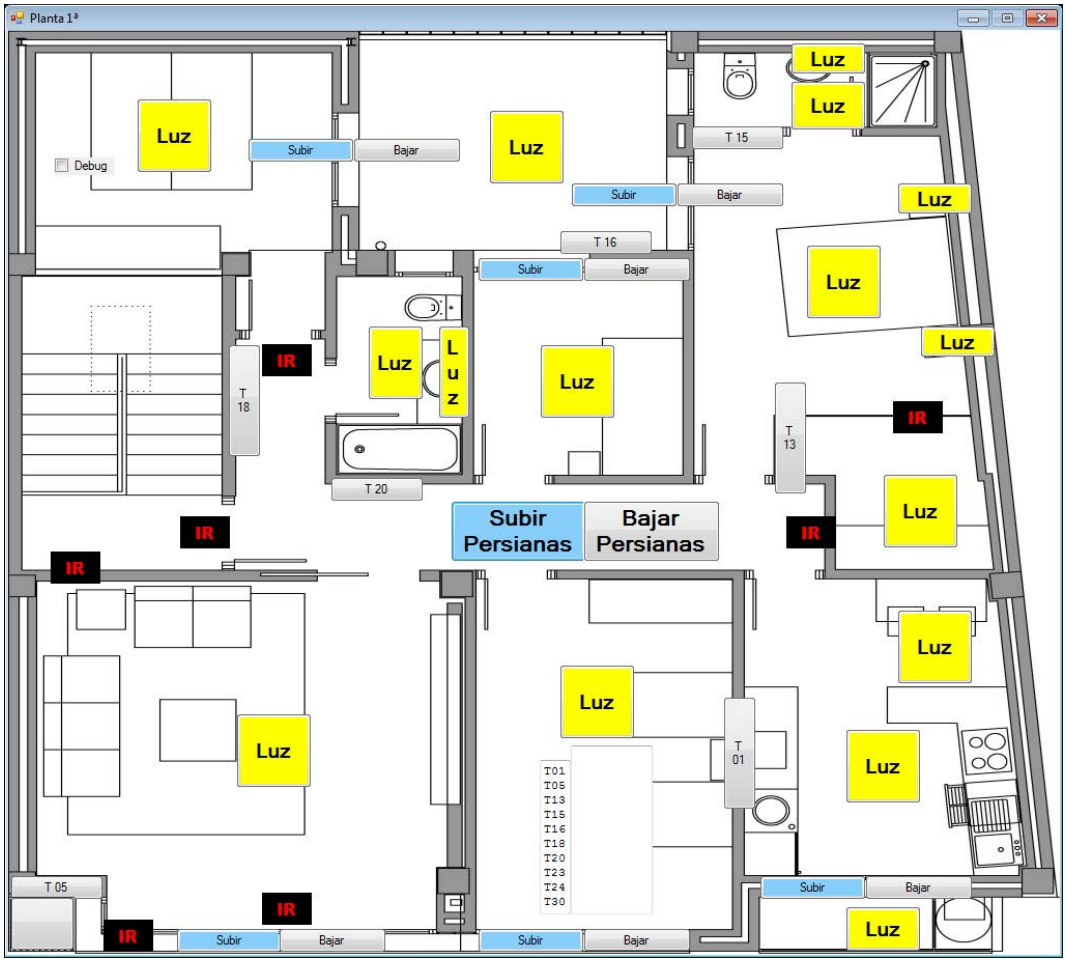


Ilustración 149. Software para Windows de control y monitorización de la instalación domótica.

Este interface de la instalación domótica tiene el inconveniente de requerir una conexión física con el bus domótico y, si bien en la instalación de la vivienda hay varias tomas repartidas en distintas estancias, es una solución recomendable para equipos fijos como los ordenadores de sobremesa.

Con la proliferación de los ordenadores portátiles y, más aún, con la omnipresencia de dispositivos como los Smartphones y las Tablets se

hizo necesaria la realización de un software, con su correspondiente pasarela al bus, que permitiera a estos dispositivos la comunicación como se realizó con los ordenadores conectados por USB.

Así, a partir de la pasarela Ethernet a serie TTL Digi Connect ME (ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, apartado 12.3.8, página 266) de la casa Digi International (Digi International Inc, s.f.) más el consiguiente driver MAX18088E para la adaptación de niveles lógicos al bus RS485, se desarrollaron sendos software para Windows y Android.

Ilustración 150. Pasarela Ethernet a serie TTL Digi Connect ME.

Ambos softwares están desarrollados en torno a la comunicación por sockets de manera que los dispositivos establecen la comunicación bidireccional con la pasarela Ethernet a RS485 teniendo la posibilidad de recibir y de enviar los comandos al bus. La conexión del equipo donde se ejecuta el software no tiene que ser física con la instalación domótica puesto que la pasarela Ethernet a RS485 está conectado vía LAN con la red local de la vivienda permitiendo así que cualquier dispositivo conectado a dicha red local, bien sea de forma cableada o inalámbrica (WIFI), pueda comunicarse con la instalación.

Además, el uso de esta pasarela no queda restringido al área local puesto que una vez configurado el router de la vivienda con los parámetros adecuados (Dynamic DNS y NAT) es posible la comunicación a través de internet. El software instalado en el equipo determina si está en la red local de la vivienda o fuera y realiza la conexión con la misma en la dirección apropiada.

Esta interface permite la monitorización y control sin ligaduras de cables y con la disponibilidad geográfica mundial a través de internet.

El software para Windows es una modificación del software comentado anteriormente utilizado con la pasarela USB a RS485 en el que en lugar de comunicar a través de un puerto serie virtual del PC se realiza la conexión de un socket con la pasarela y después se utiliza el flujo de datos bidireccional.

El software para dispositivos Android se ha desarrollado en lenguaje Basic for Android (B4A. Anywhere Software, s.f.), creando una aplicación para su instalación en Smartphones y Tablets que crea el socket de comunicación con la pasarela Ethernet a Serie de forma que, igualmente que el software para Windows, puede realizar la conexión tanto en la red local como a través de internet. Gracias a que la comunicación con el bus requiere un ancho de banda muy pequeño se puede conectar a través de internet vía WIFI y LTE como también mediante conexiones móviles lentas como GPRS.

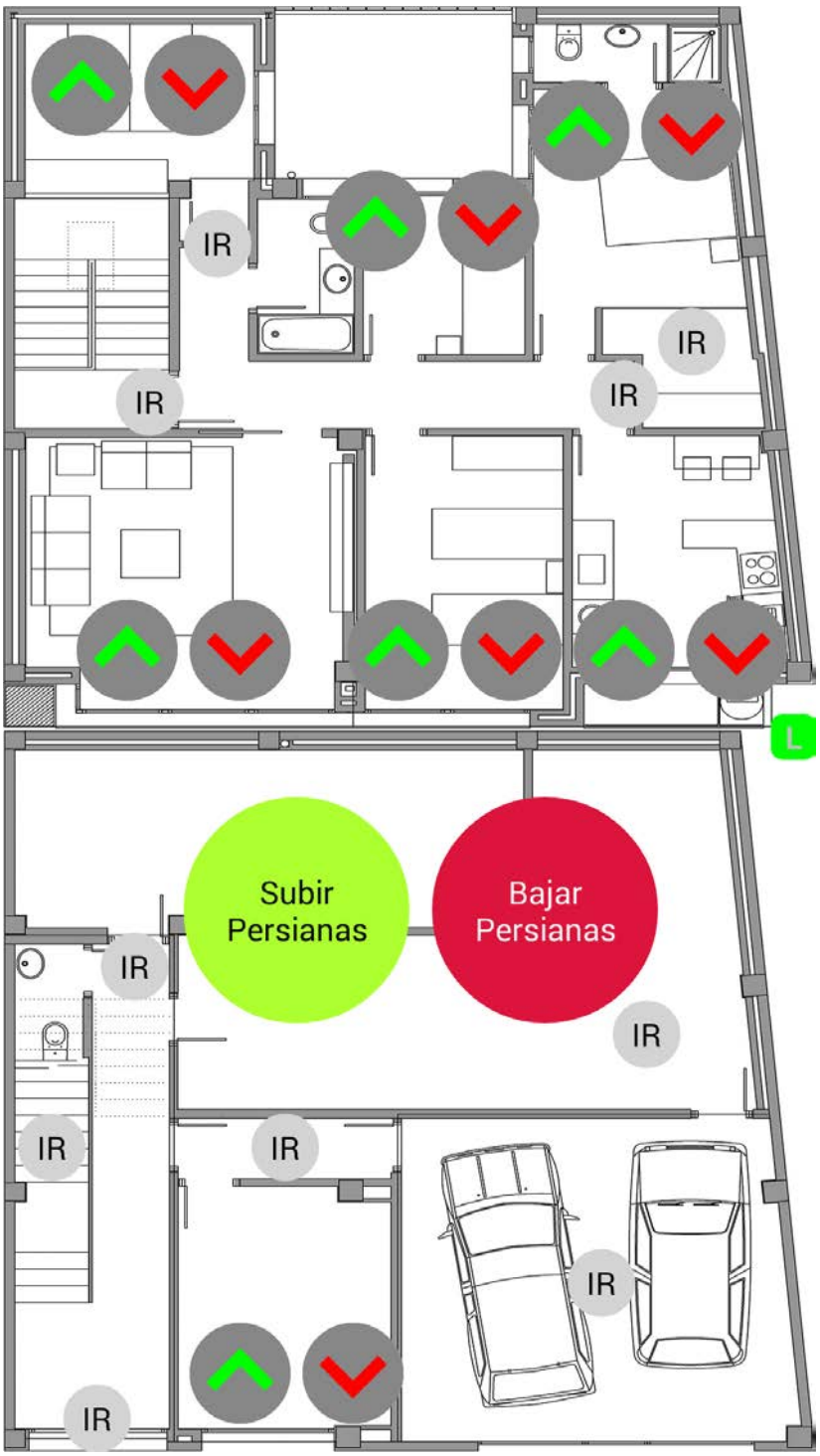


Ilustración 151. Software para Android de monitorización y control de la instalación domótica.

Los programas anteriormente referidos no sólo permiten al usuario interactuar con la instalación domótica sino también tienen opciones para configurar parámetros de la misma dando el control total al instalador o al usuario experto.

Así pues, una vez realizada la instalación física de las tarjetas domóticas es posible cambiar modos de funcionamiento, activaciones de salidas, etc., sin necesidad de acceder físicamente a dichos dispositivos. Desde los programas de monitorización y control se puede acceder a menús de configuración que pueden modificar los parámetros de configuración de las tarjetas base.

A modo de ejemplo se ha desarrollado dentro de la aplicación un apartado que permite el cambio de configuración en dos tarjetas para modificar el comportamiento de algunas entradas y salidas.

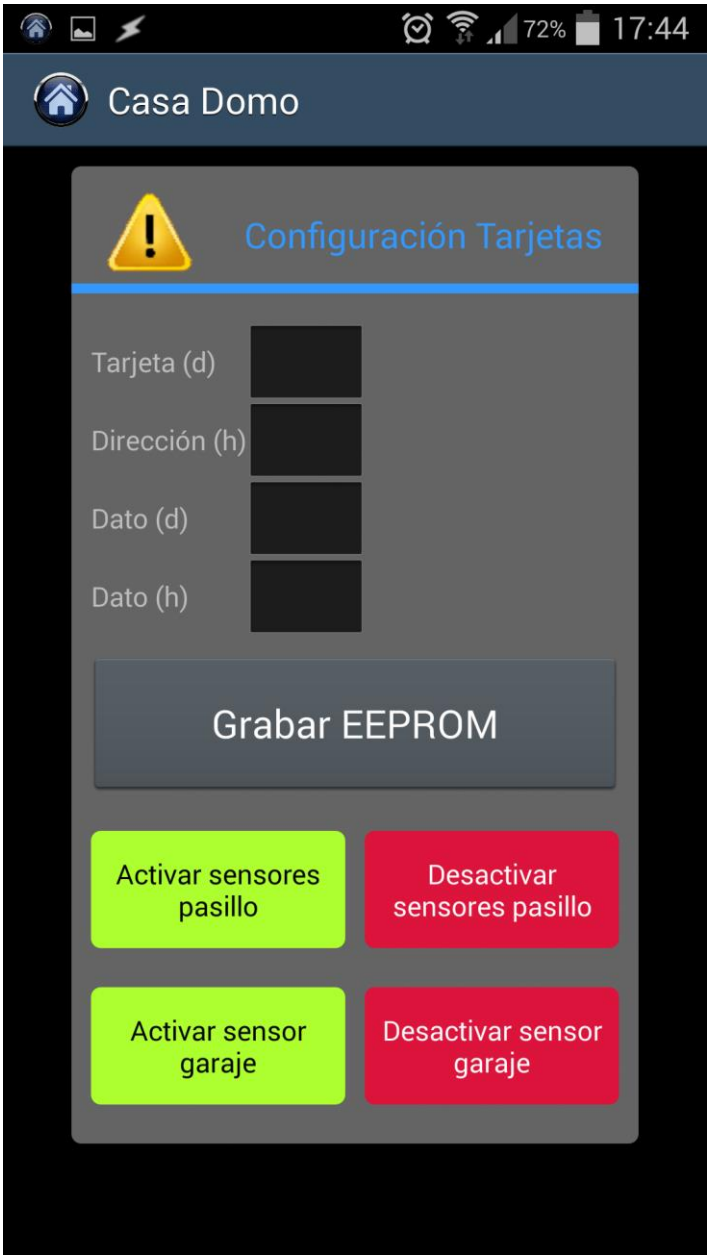


Ilustración 152. Menú de configuración de las tarjetas domóticas desde Android.

El primer ejemplo es el de controlar si los sensores de presencia del pasillo de la planta primera activarán o no las luces de dicho pasillo. Esta funcionalidad tiene su justificación en impedir la activación de las luces del pasillo en la noche si el bebé está durmiendo con la puerta

abierta de su habitación y así no notará por ejemplo si sus padres salen de la habitación hacia la nevera de la cocina en plena noche.

El segundo ejemplo es el la desactivación del sensor de presencia del garaje que controla la iluminación del mismo. Si se desea utilizar esta estancia como lugar de reunión no es deseable que si durante algún periodo de tiempo no se detecta movimiento la iluminación se apague. Así desactivando el sensor la iluminación puede controlarse tanto con los pulsadores locales como desde los programas descritos.

En ambos ejemplos, la desactivación de los sensores consiste en desviar la orden de activación en lugar de a la tarjeta con la salida normalmente asociada a una dirección diferente. De esta forma la información de la activación del sensor se presenta igualmente en el bus y puede ser recogida por el sistema, pero no activará la iluminación a la que originalmente estaba destinada.

12.2. Especificaciones técnicas de los equipos de climatización

El equipo de climatización está formado por una caldera de gas natural ROCA VEGA 24 AIFM, una enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007 y fancoils ROCA RFR 2 y RFR 3.

A continuación se detallan las características técnicas más relevantes de estos equipos y se señala el rendimiento estimado.

12.2.1. Caldera ROCA VEGA 24 AIFM

Es una caldera mural estanca de gas natural para calefacción y ACS. Su funcionamiento es electrónico con encendido automático sin llama piloto y con seguridad de la llama por sonda de ionización.

Ilustración 153. Caldera mural estanca de gas natural ROCA VEGA 24 AIFM.

Potencia útil en Calefacción	9374 / 24080 kcal/h 10.9 / 28 kW
Potencia útil en A.C.S.	7.482 / 24.080 kcal/h 8.7 / 28 kW
Producción continua de A.C.S.	16.1 l/min (Δt=25ºC)
Capacidad depósito Acumulador	60 l
Rendimiento de Combustión	92.4%
Prioridad A.C.S.	100%
Potencia Calefacción y A.C.S	Modulante
Sistema regulación	Electrónico
Selección temperatura A.C.S.	Desde panel de control
Caudal mínimo encendido A.C.S.	0 l/min
Encendido	Electrónico automático
Control de llama	Sonda ionización
Peso aproximado	56 kg
Presión máxima y mínima de servicio de circuito de Calefacción	3 bar / 0.45 bar
Temperatura máxima y mínima de servicio de circuito de Calefacción	80ºC / 40ºC
Capacidad bruta depósito expansión	10 l
Presión llenado depósito expansión	1 bar

Presión máxima y mínima de servicio del circuito A.C.S.	7 bar / 0.2 bar
Temperatura máxima y mínima de servicio del circuito A.C.S.	63ºC / 40ºC
Tipo de protección eléctrica	IP44
Confort del A.C.S., según pr/EN 13203	★★★

Tabla 50. Especificaciones técnicas caldera ROCA VEGA 24 AIFM.

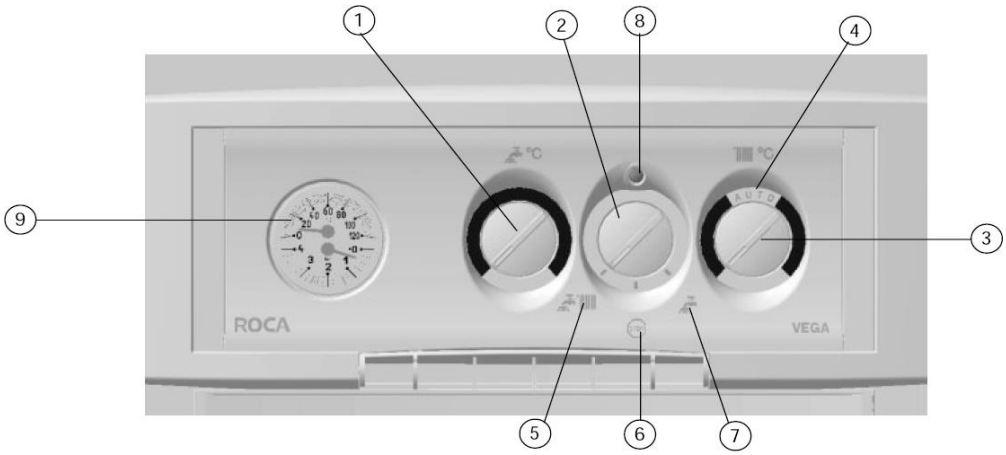


Ilustración 154. Panel de control de la caldera ROCA VEGA 24 AIFM.

1	Selector de temperatura de A.C.S.
2	Selector de servicio, paro o rearme
3	Selector temperatura Calefacción
4	Sistema de Autorregulación
5	Servicio invierno
6	Apagado-rearme
7	Servicio verano
8	Señalización luminosa de estado caldera
9	Termohidrómetro

Tabla 51. Descripción de los elementos del panel de control de la caldera ROCA VEGA 24 AIFM.

12.2.2. Enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007

La enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007 es una enfriadora de agua de condensación por aire eléctrica con un compresor Scroll y refrigerante ecológico R-410A. Dispone integrada la sección hidrónica con bomba y depósito de expansión. Un sistema de control electrónico autoadaptativo, basado en microprocesador, asegura un control inteligente de la secuencia de arranque de los compresores, permitiendo el funcionamiento con bajos volúmenes de agua en el sistema.

Ilustración 155. Enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007.

La unidad incorpora un ventilador axial de dos velocidades con descarga de aire horizontal. Su avanzado diseño permite un funcionamiento con un nivel de ruido excepcionalmente bajo. En condiciones de carga parcial o a temperaturas exteriores bajas, la velocidad del ventilador se reduce automáticamente en un 50% para un funcionamiento aún más silencioso. El sistema de control permite

también el funcionamiento programado a velocidad reducida durante un periodo de tiempo determinado.

Los intercambiadores de calor refrigerante-agua son de placas, lo que asegura una transferencia óptima de calor con reducidas dimensiones. Las placas están hechas de acero inoxidable soldado. Este tipo de intercambiador de calor requiere menos refrigerante que los intercambiadores de calor tradicionales de la misma capacidad.

El refrigerante R-4010A es una mezcla de R-32 y R-125 asegurando rendimientos superiores a los del R-22, y ofrece una solución económica a los problemas de protección del medio ambiente. No es perjudicial para la capa de ozono y se emplea como sustituto del R-22 en aplicaciones de potencias pequeñas o medianas.

Los compresores Scroll tienen un funcionamiento muy silencioso y sin vibraciones. Son conocidos por su gran duración y fiabilidad. Los motores están totalmente refrigerados por el gas de aspiración y permiten hasta 12 arranques por hora. Estos compresores están diseñados especialmente para funcionar con R-410A.

Los componentes hidrónicos vienen montados de fábrica, lo que evita la instalación de los mismos en obra.

El módulo hidrónico incluye:

- un interruptor de flujo
- un vaso de expansión
- una bomba de circulación de tres velocidades
- una válvula de purga manual
- una válvula de drenaje de agua
- una válvula de seguridad

El control PRO-DIALOG Plus es un avanzado sistema numérico de control que combina inteligencia compleja con gran simplicidad de funcionamiento. El PRO-DIALOG Plus vigila constantemente todos los parámetros y dispositivos de seguridad de la máquina y gestiona con precisión el funcionamiento del compresor y de los ventiladores para

conseguir una eficiencia energética óptima. También controla el funcionamiento de la bomba de agua.

El algoritmo de control PID, con compensación permanente de la diferencia entre la temperatura de entrada y salida del agua, prevé variaciones de carga y asegura un control inteligente de la temperatura de salida del agua.

Punto de consigna dual: pueden programarse o seleccionarse manualmente dos puntos de consigna de temperatura de agua de alimentación diferentes, según la carga térmica esperada a lo largo del día en las zonas a climatizar. Esto asegura siempre el máximo confort con mínimo consumo de energía.

El control PRO-DIALOG Plus se adapta automáticamente para mejorar la protección de la enfriadora. El funcionamiento cíclico del compresor se adapta automáticamente a las características de la aplicación de acuerdo con la inercia del circuito de agua y evita peligrosos ciclos cortos del compresor.

DATOS FÍSICOS	
Capacidad frigorífica neta	6.48 kW
Peso en operación	71 kg
Carga de refrigerante	1.47 kg
Compresor	Uno, Scroll
Evaporador	Uno, de tipo placas
Volumen neto de agua	0.85 l
Máxima presión agua	3 kPa
Circuito hidráulico	
Bomba	Uno, a tres velocidades
Presión disponible	36 kPa
Conexiones entrada/salida agua	1 pulgada
Volumen del vaso de expansión	1 l
Ventilador	Uno, axial
Diámetro ventilador	370 mm
Nº de palas ventilador	4
Velocidad ventilador	18.2 r/s

DATOS ELÉCTRICOS	
Alimentación	230 V / 50 Hz
Rango tensión	198-264 V
Consumo nominal	2700 W
Amperios a rotor bloqueado	50 A
Amperios a plena carga	18 A
Compresor	
Amperios a rotor bloqueado	50 A
Amperios a plena carga	16.9 A
Bomba de circulación de agua	230 V / 50 Hz
Corriente absorbida	0.3 A
Motor del ventilador	230 V / 50 Hz
Corriente absorbida	0.82 A
Calentador de cárter	230 V / 50 Hz
Corriente absorbida	0.11 A
CAUDAL/VOLUMEN DE AGUA	
Caudal de agua nominal	0.31 l/s
Volumen de agua del sistema	
Mínimo	22 l
Máximo	30 l
NIVELES SONOROS	
125 Hz	72 dB
250 Hz	67 dB
500 Hz	66 dB
1000 Hz	63 dB
2000 Hz	58 dB
4000 Hz	53 dB
8000 Hz	47 dB
dB(A)	68 dB

Tabla 52. Características técnicas enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007.

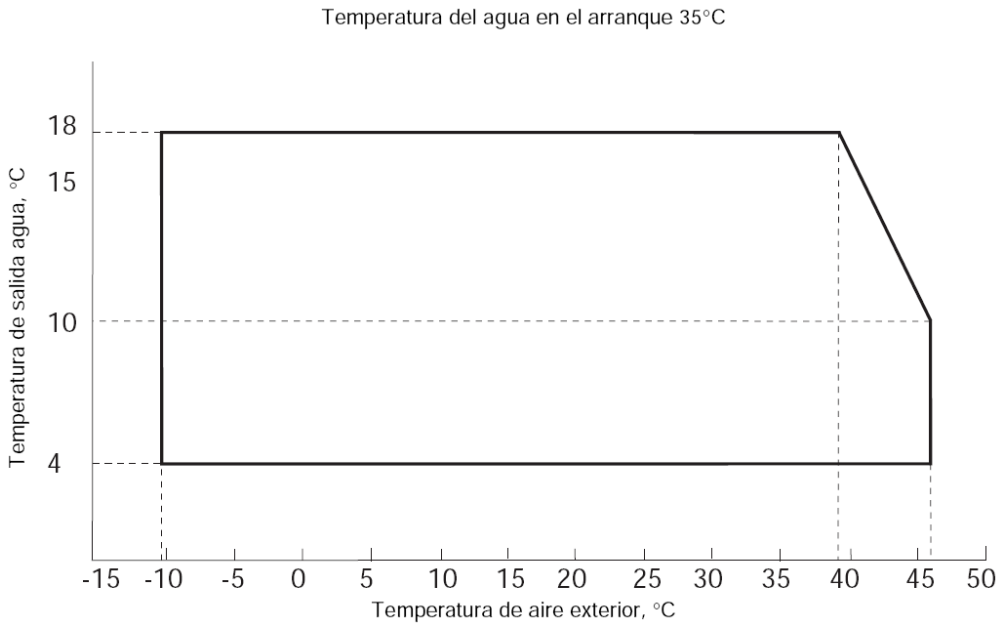


Ilustración 156. Límites de funcionamiento enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007.

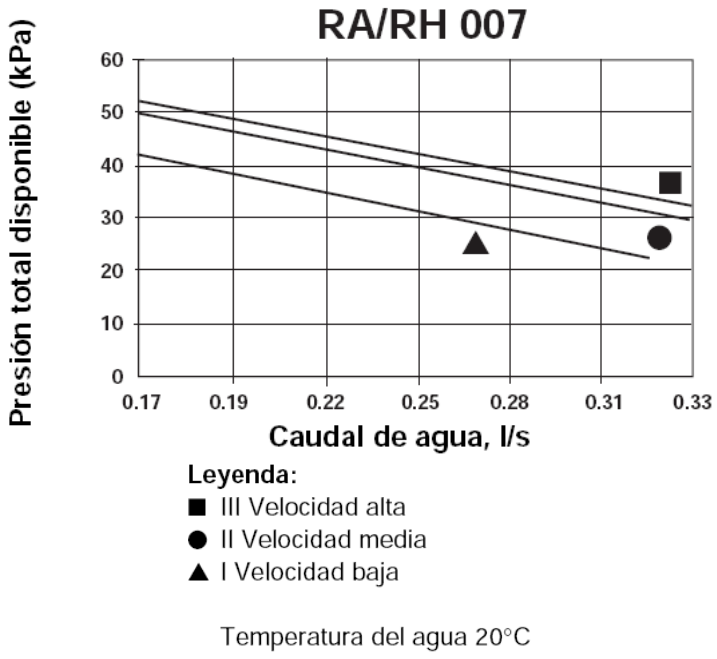


Ilustración 157. Presión total disponible enfriadora CARRIER Aquasnap Junior 30RA007.

30RA		Temperatura del aire a la entrada del condensador, °C																											
	LWT	25						30						35						40						45			
		CAP	COMP	UNIT	COOL		PRES	CAP	COMP	UNIT	COOL		PRES	CAP	COMP	UNIT	COOL		PRES	CAP	COMP	UNIT	COOL		PRES	CAP	COMP	UNIT	COOL		PRES
	C	kW	kW	kW	l/s	kPa	kPa	kW	kW	kW	l/s	kPa	kPa	kW	kW	kW	l/s	kPa	kPa	kW	kW	kW	l/s	kPa	kPa	kW	kW	kW	l/s	kPa	kPa
005	5	5,02	1,52	1,64	0,24	14	45	4,98	1,71	1,83	0,24	14	45	4,81	1,9	2,02	0,23	13	47	4,48	2,09	2,22	0,21	11	50	-	-	-	-	-	-
007		6,72	1,99	2,19	0,32	10	35	6,37	2,23	2,44	0,3	9	38	6,03	2,48	2,69	0,29	8	40	5,71	2,74	2,94	0,27	7	44	-	-	-	-	-	-
009		8,01	2,25	2,45	0,38	26	46	7,71	2,53	2,73	0,37	25	47	7,27	2,83	3,03	0,35	23	49	6,72	3,14	3,34	0,32	19	52	-	-	-	-	-	-
011		9,74	2,21	2,59	0,46	20	33	9,6	2,51	2,89	0,46	19	34	9,25	2,82	3,19	0,44	18	36	8,69	3,14	3,51	0,41	16	38	7,92	3,46	3,84	0,38	14	41
013		12	3,4	3,77	0,57	28	33	11,4	3,78	4,14	0,55	26	35	10,8	4,18	4,54	0,52	22	37	10,1	4,6	4,97	0,48	18	39	-	-	-	-	-	-
005	6	5,16	1,54	1,66	0,25	15	44	5,14	1,73	1,85	0,24	15	44	4,98	1,92	2,04	0,24	14	45	4,67	2,12	2,24	0,22	12	49	-	-	-	-	-	-
007		6,94	2,01	2,21	0,33	11	33	6,59	2,25	2,45	0,31	10	37	6,26	2,49	2,69	0,3	9	38	5,94	2,74	2,94	0,28	7	42	5,64	2,99	3,2	0,27	7	44
009		8,12	2,26	2,46	0,39	28	45	7,85	2,54	2,74	0,37	25	47	7,45	2,84	3,04	0,35	24	48	6,93	3,15	3,35	0,33	21	51	6,29	3,48	3,68	0,3	17	54
011		9,8	2,21	2,58	0,47	20	33	9,73	2,52	2,89	0,46	19	34	9,45	2,83	3,2	0,45	19	35	8,96	3,16	3,53	0,43	17	37	8,27	3,49	3,86	0,39	14	40
013		12,2	3,42	3,78	0,58	29	33	11,7	3,79	4,16	0,56	27	34	11	4,19	4,55	0,53	24	36	10,3	4,62	4,98	0,49	19	38	-	-	-	-	-	-
005	7	5,3	1,56	1,68	0,25	15	44	5,3	1,75	1,87	0,25	15	44	5,15	1,94	2,07	0,24	15	44	4,85	2,14	2,26	0,23	13	47	4,42	2,33	2,46	0,21	11	50
007		7,16	2,03	2,24	0,34	12	31	6,81	2,26	2,46	0,32	11	33	6,48	2,49	2,7	0,31	10	37	6,17	2,74	2,94	0,29	8	40	5,87	2,98	3,19	0,28	7	42
009		8,22	2,27	2,46	0,39	28	45	7,99	2,55	2,75	0,38	26	46	7,63	2,85	3,05	0,36	24	48	7,15	3,16	3,36	0,34	22	50	6,54	3,49	3,69	0,31	18	53
011		9,86	2,2	2,58	0,47	20	33	9,86	2,52	2,89	0,47	20	33	9,65	2,84	3,22	0,46	19	34	9,24	3,18	3,55	0,44	18	36	8,62	3,52	3,89	0,41	16	38
013		12,5	3,44	3,8	0,6	32	32	11,9	3,81	4,17	0,57	28	33	11,2	4,21	4,57	0,54	25	35	10,5	4,64	5	0,5	20	38	9,77	5,09	5,46	0,47	17	39
005	8	5,44	1,58	1,7	0,26	17	42	5,45	1,77	1,89	0,26	17	42	5,32	1,97	2,09	0,25	15	44	5,04	2,16	2,28	0,24	14	45	4,62	2,36	2,48	0,22	12	49
007		7,38	2,05	2,26	0,35	13	29	7,04	2,27	2,48	0,34	12	31	6,71	2,5	2,7	0,32	10	35	6,4	2,73	2,94	0,3	10	37	6,1	2,97	3,17	0,29	8	40
009		8,32	2,27	2,47	0,4	29	44	8,13	2,56	2,76	0,39	28	45	7,81	2,86	3,06	0,37	25	47	7,36	3,18	3,38	0,35	23	49	6,79	3,51	3,71	0,32	19	52
011		9,93	2,2	2,57	0,47	20	33	10	2,52	2,89	0,48	21	32	9,86	2,85	3,23	0,47	20	33	9,52	3,19	3,57	0,45	19	35	8,97	3,54	3,92	0,43	17	37
013		12,7	3,45	3,82	0,61	33	31	12,1	3,82	4,19	0,58	29	33	11,5	4,22	4,59	0,55	26	35	10,7	4,65	5,02	0,51	21	37	9,96	5,11	5,47	0,47	17	39
005	9	5,58	1,6	1,73	0,27	18	40	5,61	1,79	1,92	0,27	18	40	5,49	1,99	2,11	0,26	17	42	5,23	2,18	2,3	0,25	15	44	4,82	2,38	2,5	0,23	13	47
007		7,6	2,07	2,28	0,36	14	27	7,26	2,28	2,49	0,35	13	29	6,93	2,5	2,71	0,33	11	33	6,62	2,73	2,93	0,32	10	35	6,33	2,96	3,16	0,3	9	38
009		8,43	2,28	2,47	0,4	29	44	8,27	2,57	2,76	0,39	29	44	7,99	2,87	3,07	0,38	26	46	7,58	3,19	3,39	0,36	24	48	7,05	3,53	3,72	0,34	22	50
011		9,99	2,19	2,56	0,48	21	32	10,1	2,52	2,9	0,48	21	32	10,1	2,86	3,24	0,48	21	32	9,79	3,21	3,59	0,47	20	33	9,32	3,57	3,94	0,44	19	35
013		13	3,47	3,83	0,62	35	30	12,4	3,84	4,2	0,59	31	32	11,7	4,24	4,6	0,56	27	34	10,9	4,67	5,03	0,52	22	37	10,1	5,12	5,49	0,48	18	39
005	10	5,72	1,62	1,75	0,27	18	40	5,76	1,82	1,94	0,27	20	38	5,66	2,01	2,13	0,27	18	40	5,42	2,2	2,32	0,26	17	42	5,02	2,4	2,52	0,24	14	45
007		7,82	2,09	2,3	0,37	15	24	7,48	2,3	2,51	0,36	14	27	7,16	2,51	2,72	0,34	12	31	6,85	2,73	2,93	0,33	11	33	6,56	2,95	3,15	0,31	10	37
009		8,53	2,28	2,48	0,41	30	43	8,41	2,58	2,77	0,4	29	44	8,17	2,88	3,08	0,39	28	45	7,8	3,2	3,4	0,37	25	47	7,3	3,54	3,74	0,35	23	49
011		10	2,19	2,56	0,48	21	32	10,3	2,53	2,9	0,49	22	31	10,3	2,87	3,25	0,49	22	31	10,1	3,23	3,61	0,48	21	32	9,67	3,6	3,97	0,46	19	34
013		13,2	3,49	3,85	0,63	36	29	12,6	3,86	4,22	0,6	32	32	11,9	4,26	4,62	0,57	28	33	11,1	4,68	5,05	0,53	24	36	10,3	5,14	5,5	0,49	19	38

Leyenda:

- **LWT** Temperatura de salida del agua
- **CAP kW** Capacidad frigorífica neta = capacidad frigorífica bruta más la capacidad correspondiente a la presión disponible (caudal x presión/0,3).
- **Comp kW** Potencia absorbida por los compresores
- **Unit kW** Potencia absorbida por la unidad (compresores, ventiladores, circuito de control y bombas) menos la capacidad correspondiente a la presión disponible (caudal x presión/0,3).
- **Cool l/s** Caudal del agua en el evaporador
- **Cool kPa** Pérdida de presión en el evaporador y el módulo hidrónico
- **Pres kPa** Presión disponible en la salida de la unidad (con un módulo hidrónico de una sola bomba)

Capacidad basada en condiciones estándar EUROVENT

Los rendimientos publicados están de acuerdo con las tolerancias EUROVENT
-5 % para capacidades de calefacción y refrigeración
+5 % para potencia absorbida
+15 % para pérdida de carga

Factores de corrección a plena carga para pruebas de laboratorio según EUROVENT:

Capacidad frigorífica neta	1,000
Relación de eficiencia energética	1,000
Pérdida de carga en el evaporador	1,000

Datos de aplicación:

Refrigerante: R-410A
Incremento de temperatura del evaporador: 5 K
Líquido del evaporador: agua enfriada
Factor de ensuciamiento: 0,000044 m^2 K/W

Tabla 53. Capacidades frigoríficas enfriadoras CARRIER Aquasnap Junior 30RA.

12.2.3. Fancoils ROCA RFR 2 y RFR3

Los Fancoils ROCA RFR están disponibles para pared o techo Disponen de un ventilador axial de 120 mm de diámetro y 3 velocidades y son aptos para calefacción y aire acondicionado. Las prestaciones de estos equipos, que se muestran en la Tabla 54, hacen referencia a las siguientes condiciones de funcionamiento:

- Refrigeración (funcionamiento veraniego):
  - Temperatura aire +27ºC b.s., + 19ºC b.u.
  - Temperatura agua +7ºC entrada, +12ºC salida
- Calefacción (funcionamiento invernal):

- Temperatura aire +20ºC
- Temperatura agua +50ºC entrada

Modelo	RFR 2			RFR 3		
Velocidad	1	2	3	1	2	3
Caudal aire (m^3/h)	160	200	250	230	290	360
Refrigeración (kW)	0.95	1.1	1.3	1.4	1.7	2.0
Calefacción (kW)	1.13	1.32	1.6	1.8	2.2	2.6
Potencia consumida por el motor (W)	20	22	27	17	22	35

Tabla 54. Especificaciones técnicas de los Fancoils ROCA serie RFR.

Los fancoils utilizados son el modelo RFR 3 para el Salón y para la Cocina y el Dormitorio 1 el modelo RFR 2.

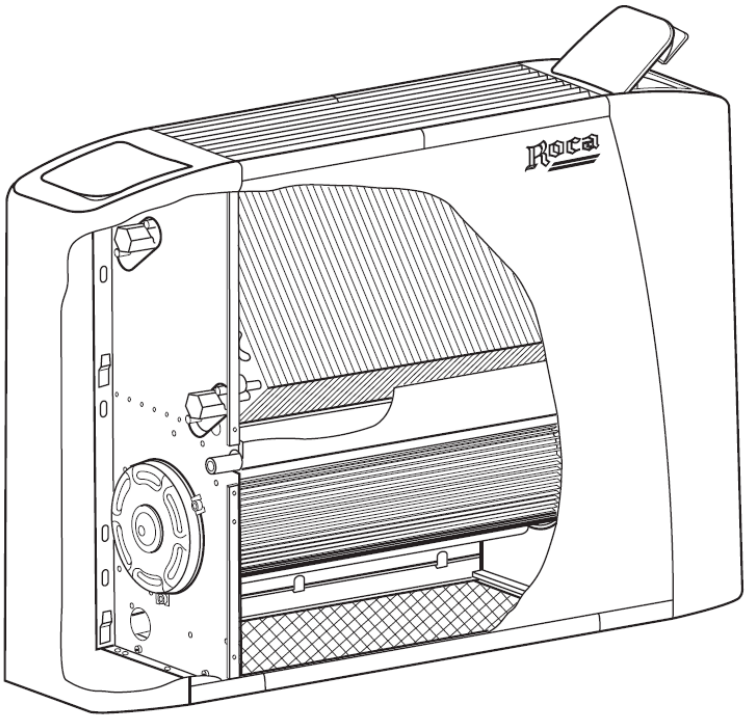


Ilustración 158. Fancoil ROCA serie RFR con ventilador tangencial.

Modelo	Velocidad	Caudal aire m³/h	Temperatura agua °C Entrada 5 - Salida 10			Temperatura agua °C Entrada 7 - Salida 12			Temperatura agua °C Entrada 12 - Salida 17		
			Caudal agua l/h	Potencia		Caudal agua l/h	Potencia		Caudal agua l/h	Potencia	
				Frig./h Tot. Watt	Frig./h Sen. Watt		Frig./h Tot. Watt	Frig./h Sen. Watt		Frig./h Tot. Watt	Frig./h Sen. Watt
1	Máx.	180	180	910	690	150	750	600	85	430	430
				1 060	800		870	700		500	500
	Med.	150	160	810	600	135	670	520	75	370	370
				930	700		780	600		430	430
	Mín.	110	130	650	460	110	540	430	60	290	290
				750	530		630	500		340	340
2	Máx.	250	275	1 380	1 010	225	1 120	870	125	630	630
				1 600	1 170		1 300	1 010		730	730
	Med.	200	240	1 210	820	190	950	740	110	540	540
				1 400	950		1 100	860		620	620
	Mín.	160	190	950	690	165	820	610	90	450	450
				1 100	800		950	710		520	520
3	Máx.	360	425	2 120	1 560	345	1 730	1 320	195	970	970
				2 450	1 800		2 000	1 530		1 120	1 120
	Med.	290	360	1 810	1 210	295	1 470	1 130	165	820	820
				2 100	1 400		1 700	1 310		950	950
	Mín.	230	300	1 510	1 040	240	1 210	930	135	670	670
				1 750	1 200		1 400	1 080		780	780
4	Máx.	500	595	2 980	2 200	485	2 420	1 890	275	1 380	1 380
				3 450	2 550		2 800	2 190		1 600	1 600
	Med.	400	510	2 550	1 730	415	2 070	1 580	225	1 120	1 120
				2 950	2 000		2 400	1 830		1 300	1 300
	Mín.	320	355	1 770	1 470	345	1 730	1 300	190	950	950
				2 050	1 700		2 000	1 500		1 100	1 100

Temperatura de entrada aire °C: Bulbo seco + 27, Bulbo húmedo + 19

Tabla 55. Potencias frigoríficas de los Fancoils ROCA serie RFR.

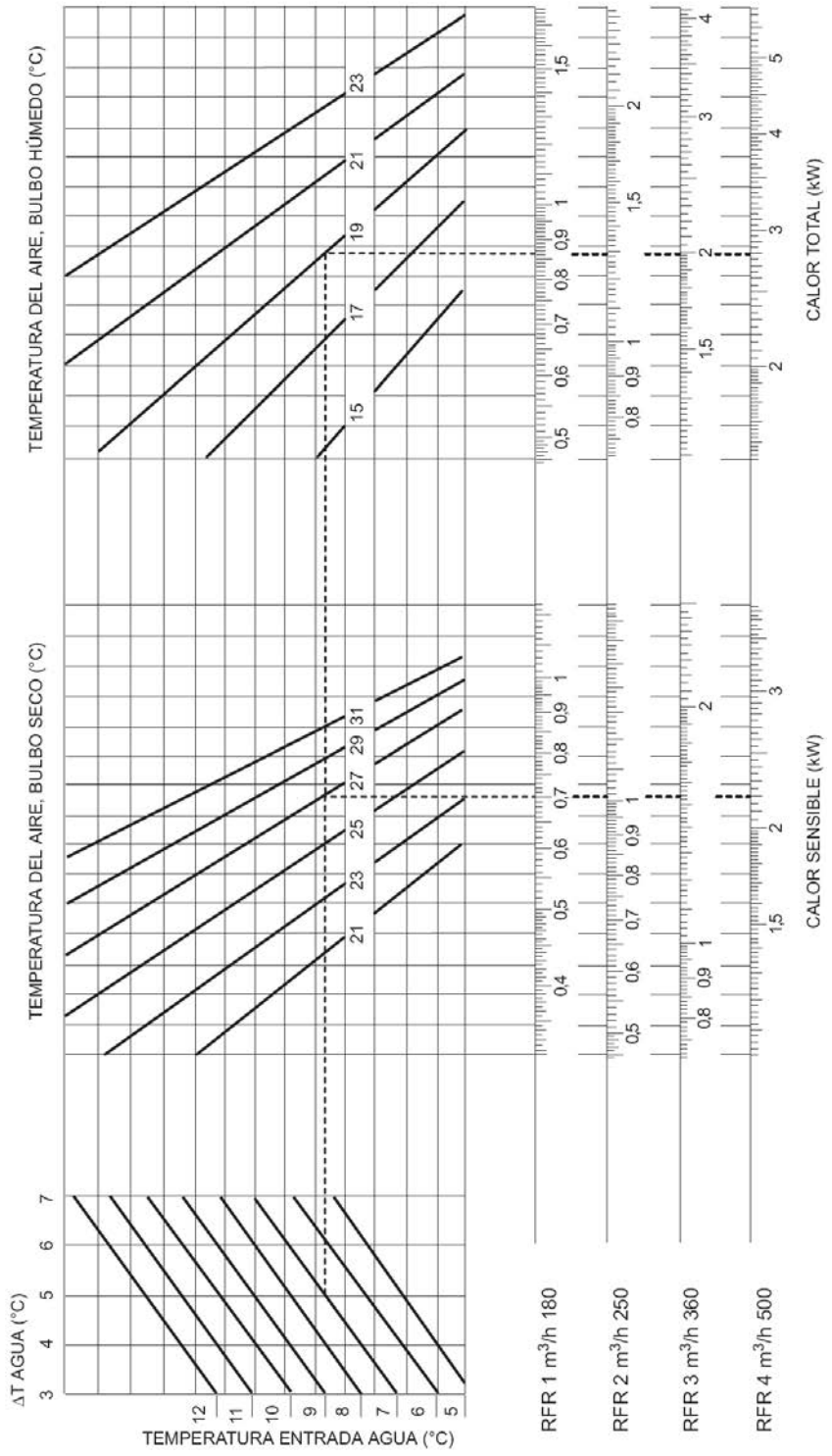


Ilustración 159. Curvas de rendimiento en enfriamiento de los Fancoils ROCA serie RFR funcionando a la máxima velocidad.

Tamaño	Velocidad	Caudal aire m³/h	Temperatura agua °C Entrada 50 - Salida 40		Temperatura agua °C Entrada 70 - Salida 60		Temperatura agua °C Entrada 85 - Salida 75	
			Caudal agua l/h	Potencia Kcal/h Watt	Caudal agua l/h	Potencia Kcal/h Watt	Caudal agua l/h	Potencia Kcal/h Watt
1	Máx.	180	90	920	175	1 760	235	2 360
				1 060		2 040		2 730
	Med.	150	80	790	155	1 530	205	2 040
				920		1 770		2 360
	Mín.	110	60	620	120	1 180	160	1 580
				720		1 370		1 830
2	Máx.	250	130	1 300	250	2 510	335	3 340
				1 510		2 900		3 860
	Med.	200	110	1 100	210	2 120	275	2 750
				1 270		2 450		3 180
	Mín.	160	90	920	175	1 730	225	2 250
				1 070		2 000		2 600
3	Máx.	360	205	2 040	390	3 900	520	5 180
				2 360		4 510		6 000
	Med.	290	170	1 720	325	3 260	435	4 330
				1 990		3 770		5 010
	Mín.	230	140	1 420	265	2 660	355	3 530
				1 640		3 080		4 090
4	Máx.	500	280	2 790	535	5 370	715	7 170
				3 230		6 210		8 300
	Med.	400	230	2 280	445	4 460	595	5 950
				2 640		5 160		6 890
	Mín.	320	190	1 890	370	3 680	490	4 920
				2 190		4 260		5 690

Temp. agua°C	Entrada aire °C			
	22	18	16	14
50/40	0,91	1,09	1,15	1,23
70/60	0,95	1,05	1,09	1,13
85/75	0,96	1,04	1,07	1,11

Coeficientes de corrección para otras condiciones de temperatura de entrada de aire.

Temperatura de entrada de aire: 20°C

Tabla 56. Potencias caloríficas de los Fancoils ROCA serie RFR

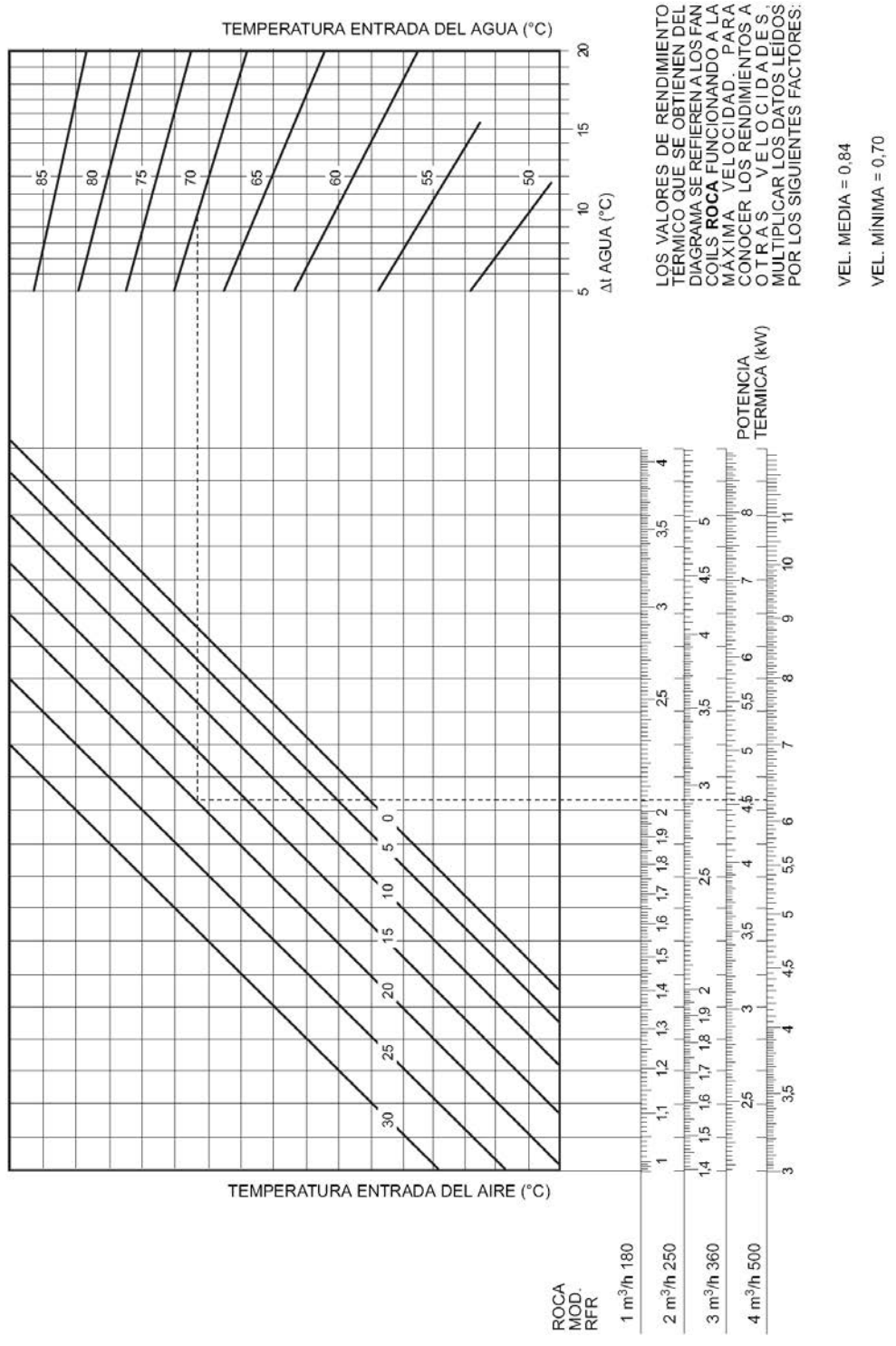


Ilustración 160. Curvas de rendimiento en calentamiento de los aparatos RFR funcionando a la máxima velocidad.

12.3. Hojas de características de los componentes electrónicos

12.3.1. Microcontrolador PIC18F2520

Power Management Features:

- Run: CPU on, Peripherals on
- Idle: CPU off, Peripherals on
- Sleep: CPU off, Peripherals off
- Ultra Low 50nA Input Leakage
- Run mode Currents Down to 11 μA Typical
- Idle mode Currents Down to 2.5 μA Typical
- Sleep mode Current Down to 100 nA Typical
- Timer1 Oscillator: 900 nA, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 1.4 μA, 2V Typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes, up to 40 MHz
- 4x Phase Lock Loop (PLL) – Available for Crystal and Internal Oscillators
- Two External RC modes, up to 4 MHz
- Two External Clock modes, up to 40 MHz
- Internal Oscillator Block:
  - Fast wake from Sleep and Idle, 1 μs typical
  - 8 use-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
  - Provides a complete range of clock speeds from 31 kHz to 32 MHz when used with PLL
  - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor:
  - Allows for safe shutdown if peripheral clock stops

Peripheral Highlights:

- High-Current Sink/Source 25 mA/25 mA
- Three Programmable External Interrupts
- Four Input Change Interrupts
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules, one with Auto-Shutdown (28-pin devices)
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module (40/44-pin devices only):
  - One, two or four PWM outputs
  - Selectable polarity
  - Programmable dead time
  - Auto-shutdown and auto-restart

Peripheral Highlights (Continued):

- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module Supporting 3-Wire SPI (all 4 modes) and I^2C™ Master and Slave modes
- Enhanced Addressable USART module:
  - Supports RS-485, RS-232 and LIN/J2602
  - RS-232 operation using internal oscillator block (no external crystal required)
  - Auto-wake-up on Start bit
  - Auto-Baud Detect
- 10-Bit, up to 13-Channel Analog-to-Digital (A/D) Converter module:
  - Auto-acquisition capability
  - Conversion available during Sleep
- Dual Analog Comparators with Input Multiplexing
- Programmable 16-Level High/Low-Voltage Detection (HLVD) module:
  - Supports interrupt on High/Low-Voltage Detection

Special Microcontroller Features:

- C Compiler Optimized Architecture:
  - Optional extended instruction set designed to optimize re-entrant code
- 100,000 Erase/Write Cycle Enhanced Flash Program Memory Typical
- 1,000,000 Erase/Write Cycle Data EEPROM Memory Typical
- Flash/Data EEPROM Retention: 100 Years Typical
- Self-Programmable under Software Control
- Priority Levels for Interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
  - Programmable period from 4 ms to 131s
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via Two Pins
- In-Circuit Debug (ICD) via Two Pins
- Wide Operating Voltage Range: 2.0V to 5.5V
- Programmable Brown-out Reset (BOR) with Software Enable Option

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-Bit A/D (ch)	CCP/ ECCP (PWM)	MSSP		EUSART	Comp.	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI	Master I^2C™			
PIC18F2420	16K	8192	768	256	25	10	2/0	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2520	32K	16384	1536	256	25	10	2/0	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4420	16K	8192	768	256	36	13	1/1	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4520	32K	16384	1536	256	36	13	1/1	Y	Y	1	2	1/3

28-Pin SPDIP, SOIC

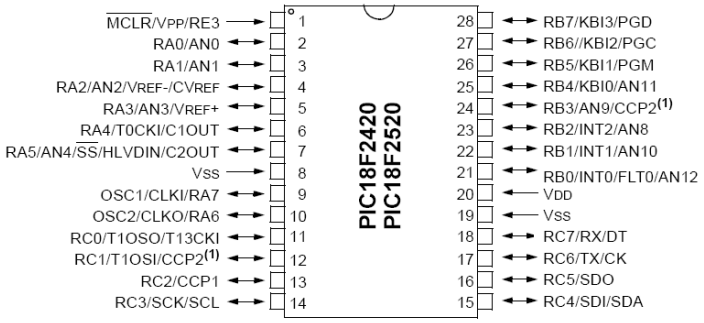
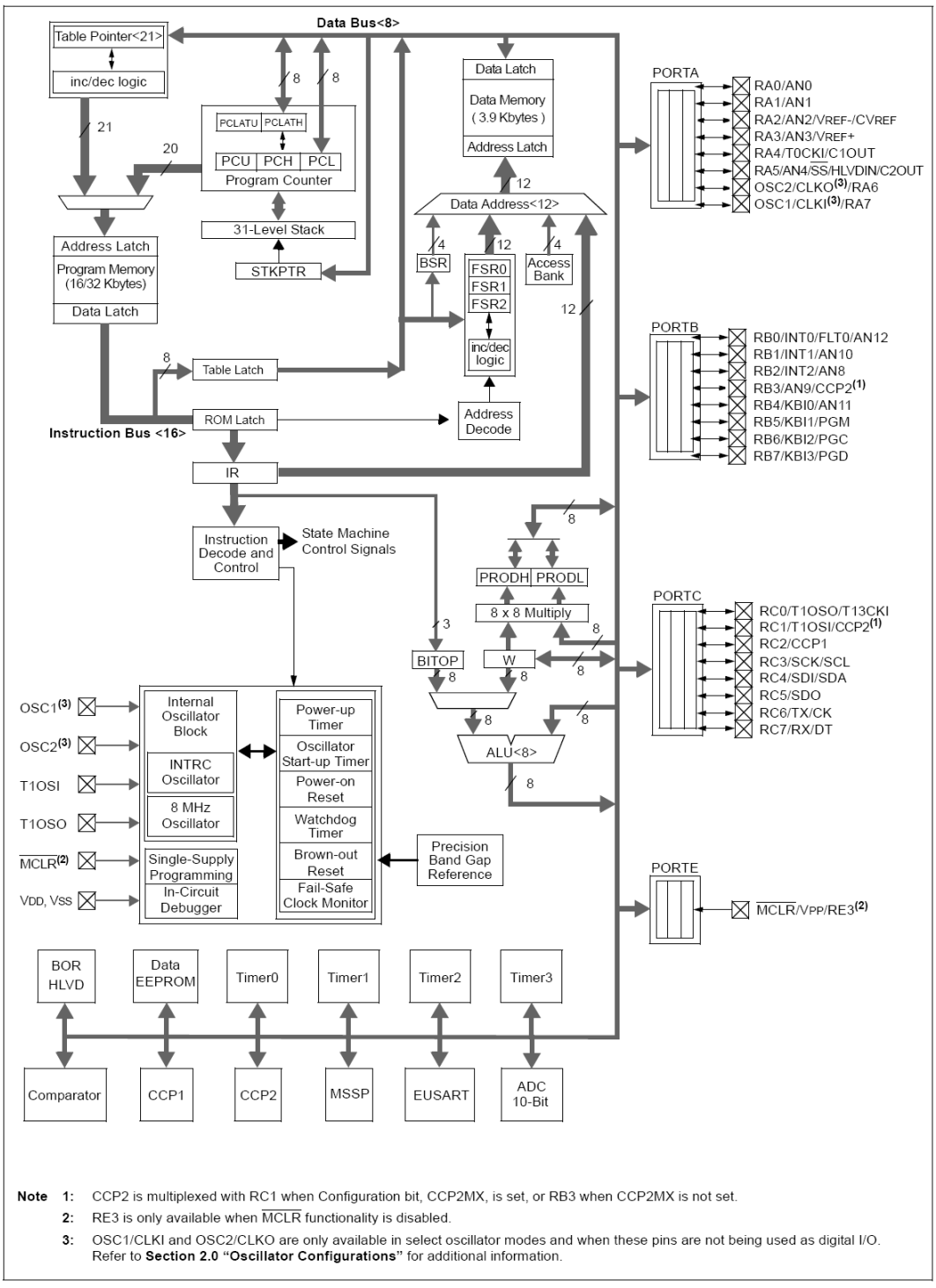


Ilustración 161. Distribución de pines en el microcontrolador PIC18F2520.

Features	PIC18F2420	PIC18F2520	PIC18F4420	PIC18F4520
Operating Frequency	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz
Program Memory (Bytes)	16384	32768	16384	32768
Program Memory (Instructions)	8192	16384	8192	16384
Data Memory (Bytes)	768	1536	768	1536
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	1	1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules	0	0	1	1
Serial Communications	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART
Parallel Communications (PSP)	No	No	Yes	Yes
10-Bit Analog-to-Digital Module	10 Input Channels	10 Input Channels	13 Input Channels	13 Input Channels
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable High/Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set Enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set Enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set Enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set Enabled
Packages	28-Pin SPDIP 28-Pin SOIC 28-Pin QFN	28-Pin SPDIP 28-Pin SOIC 28-Pin QFN	40-Pin PDIP 44-Pin QFN 44-Pin TQFP	40-Pin PDIP 44-Pin QFN 44-Pin TQFP

Tabla 57. Características de los microcontroladores de la familia PIC18F2520.



Note 1: CCP2 is multiplexed with RC1 when Configuration bit, CCP2MX, is set, or RB3 when CCP2MX is not set.

2: RE3 is only available when MCLR functionality is disabled.

3: OSC1/CLKI and OSC2/CLKO are only available in select oscillator modes and when these pins are not being used as digital I/O. Refer to **Section 2.0 "Oscillator Configurations"** for additional information.

Ilustración 162. Diagrama de bloques del microcontrolador PIC18F2520.

Pin Name	Pin Number		Pin Type	Buffer Type	Description
	SPDIP, SOIC	QFN			
$\overline{MCLR}$/VPP/RE3	1	26			Master Clear (input) or programming voltage (input).
$\overline{MCLR}$			I	ST	Master Clear (Reset) input. This pin is an active-low Reset to the device.
VPP			P		Programming voltage input.
RE3			I	ST	Digital input.
OSC1/CLKI/RA7	9	6			Oscillator crystal or external clock input.
OSC1			I	ST	Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
CLKI			I	CMOS	External clock source input. Always associated with pin function, OSC1. (See related OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins.)
RA7			I/O	TTL	General purpose I/O pin.
OSC2/CLKO/RA6	10	7			Oscillator crystal or clock output.
OSC2			O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode.
CLKO			O	—	In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate.
RA6			I/O	TTL	General purpose I/O pin.

Pin Name	Pin Number		Pin Type	Buffer Type	Description
	SPDIP, SOIC	QFN			
					PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
RB0/INT0/FLT0/AN12	21	18			
RB0			I/O	TTL	Digital I/O.
INT0			I	ST	External interrupt 0.
FLT0			I	ST	PWM Fault input for CCP1.
AN12			I	Analog	Analog input 12.
RB1/INT1/AN10	22	19			
RB1			I/O	TTL	Digital I/O.
INT1			I	ST	External interrupt 1.
AN10			I	Analog	Analog input 10.
RB2/INT2/AN8	23	20			
RB2			I/O	TTL	Digital I/O.
INT2			I	ST	External interrupt 2.
AN8			I	Analog	Analog input 8.
RB3/AN9/CCP2	24	21			
RB3			I/O	TTL	Digital I/O.
AN9			I	Analog	Analog input 9.
CCP2(1)			I/O	ST	Capture 2 input/Compare 2 output/PWM2 output.
RB4/KBI0/AN11	25	22			
RB4			I/O	TTL	Digital I/O.
KBI0			I	TTL	Interrupt-on-change pin.
AN11			I	Analog	Analog input 11.
RB5/KBI1/PGM	26	23			
RB5			I/O	TTL	Digital I/O.
KBI1			I	TTL	Interrupt-on-change pin.
PGM			I/O	ST	Low-Voltage ICSP™ Programming enable pin.
RB6/KBI2/PGC	27	24			
RB6			I/O	TTL	Digital I/O.
KBI2			I	TTL	Interrupt-on-change pin.
PGC			I/O	ST	In-Circuit Debugger and ICSP programming clock pin.
RB7/KBI3/PGD	28	25			
RB7			I/O	TTL	Digital I/O.
KBI3			I	TTL	Interrupt-on-change pin.
PGD			I/O	ST	In-Circuit Debugger and ICSP programming data pin.

Legend: TTL = TTL compatible input; CMOS = CMOS compatible input or output; ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels; I = Input; O = Output; P = Power

Note 1: Default assignment for CCP2 when Configuration bit, CCP2MX, is set.
2: Alternate assignment for CCP2 when Configuration bit, CCP2MX, is cleared.

					PORTA is a bidirectional I/O port.
RA0/AN0	2	27			
RA0			I/O	TTL	Digital I/O.
AN0			I	Analog	Analog input 0.
RA1/AN1	3	28			
RA1			I/O	TTL	Digital I/O.
AN1			I	Analog	Analog input 1.
RA2/AN2/VREF-/CVREF	4	1			
RA2			I/O	TTL	Digital I/O.
AN2			I	Analog	Analog input 2.
VREF-			I	Analog	A/D reference voltage (low) input.
CVREF			O	Analog	Comparator reference voltage output.
RA3/AN3/VREF+	5	2			
RA3			I/O	TTL	Digital I/O.
AN3			I	Analog	Analog input 3.
VREF+			I	Analog	A/D reference voltage (high) input.
RA4/T0CKI/C1OUT	6	3			
RA4			I/O	ST	Digital I/O.
T0CKI			I	ST	Timer0 external clock input.
C1OUT			O	—	Comparator 1 output.
RA5/AN4/$\overline{SS}$/HLVDIN/ C2OUT	7	4			
RA5			I/O	TTL	Digital I/O.
AN4			I	Analog	Analog input 4.
$\overline{SS}$			I	TTL	SPI slave select input.
HLVDIN			I	Analog	High/Low-Voltage Detect input.
C2OUT			O	—	Comparator 2 output.
RA6					See the OSC2/CLKO/RA6 pin.
RA7					See the OSC1/CLKI/RA7 pin.

Legend: TTL = TTL compatible input
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels
O = Output
CMOS = CMOS compatible input or output
I = Input
P = Power

Note 1: Default assignment for CCP2 when Configuration bit, CCP2MX, is set.
2: Alternate assignment for CCP2 when Configuration bit, CCP2MX, is cleared.

					PORTC is a bidirectional I/O port.
RC0/T1OSO/T13CKI	11	8			
RC0			I/O	ST	Digital I/O.
T1OSO			O	—	Timer1 oscillator output.
T13CKI			I	ST	Timer1/Timer3 external clock input.
RC1/T1OSI/CCP2	12	9			
RC1			I/O	ST	Digital I/O.
T1OSI			I	Analog	Timer1 oscillator input.
CCP2(2)			I/O	ST	Capture 2 input/Compare 2 output/PWM2 output.
RC2/CCP1	13	10			
RC2			I/O	ST	Digital I/O.
CCP1			I/O	ST	Capture 1 input/Compare 1 output/PWM1 output.
RC3/SCK/SCL	14	11			
RC3			I/O	ST	Digital I/O.
SCK			I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI mode.
SCL			I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I^2C™ mode.
RC4/SDI/SDA	15	12			
RC4			I/O	ST	Digital I/O.
SDI			I	ST	SPI data in.
SDA			I/O	ST	I^2C data I/O.
RC5/SDO	16	13			
RC5			I/O	ST	Digital I/O.
SDO			O	—	SPI data out.
RC6/TX/CK	17	14			
RC6			I/O	ST	Digital I/O.
TX			O	—	EUSART asynchronous transmit.
CK			I/O	ST	EUSART synchronous clock (see related RX/DT).
RC7/RX/DT	18	15			
RC7			I/O	ST	Digital I/O.
RX			I	ST	EUSART asynchronous receive.
DT			I/O	ST	EUSART synchronous data (see related TX/CK).
RE3	—	—	—	—	See $\overline{MCLR}$/VPP/RE3 pin.
VSS	8, 19	5, 16	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	20	17	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: TTL = TTL compatible input; CMOS = CMOS compatible input or output; ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels; I = Input; O = Output; P = Power

Note 1: Default assignment for CCP2 when Configuration bit, CCP2MX, is set.
2: Alternate assignment for CCP2 when Configuration bit, CCP2MX, is cleared.

Tabla 58. Descripción de los pines de Entrada/Salida del microcontrolador PIC18F2520.

12.3.2. Transceptor RS485 MAX13088E

General Description

The MAX13080E–MAX13089E +5.0V, ±15kV ESD-protected, RS-485/RS-422 transceivers feature one driver and one receiver. These devices include fail-safe circuitry, guaranteeing a logic-high receiver output when receiver inputs are open or shorted. The receiver outputs a logic-high if all transmitters on a terminated bus are disabled (high impedance). The MAX13080E–MAX13089E include a hot-swap capability to eliminate false transitions on the bus during power-up or hot insertion.

The MAX13080E/MAX13081E/MAX13082E feature reduced slew-rate drivers that minimize EMI and reduce reflections caused by improperly terminated cables, allowing error-free data transmission up to 250kbps. The MAX13083E/MAX13084E/MAX13085E also feature slew-rate-limited drivers but allow transmit speeds up to 500kbps. The MAX13086E/MAX13087E/MAX13088E driver slew rates are not limited, making transmit speeds up to 16Mbps possible. The MAX13089E slew rate is pin selectable for 250kbps, 500kbps, and 16Mbps.

The MAX13082E/MAX13085E/MAX13088E are intended for half-duplex communications, and the MAX13080E/MAX13081E/MAX13083E/MAX13084E/MAX13086E/MAX13087E are intended for full-duplex communications. The MAX13089E is selectable for half-duplex or full-duplex operation. It also features independently programmable receiver and transmitter output phase through separate pins.

The MAX13080E–MAX13089E transceivers draw 1.2mA of supply current when unloaded or when fully loaded with the drivers disabled. All devices have a 1/8-unit load receiver input impedance, allowing up to 256 transceivers on the bus.

The MAX13080E/MAX13083E/MAX13086E/MAX13089E are available in 14-pin PDIP and 14-pin SO packages. The MAX13081E/MAX13082E/MAX13084E/MAX13085E/MAX13087E/MAX13088E are available in 8-pin PDIP and 8-pin SO packages. The devices operate over the commercial, extended, and automotive temperature ranges.

Features

- **+5.0V Operation**
- **Extended ESD Protection for RS-485/RS-422 I/O Pins ±15kV Human Body Model**
- **True Fail-Safe Receiver While Maintaining EIA/TIA-485 Compatibility**
- **Hot-Swap Input Structures on DE and $\overline{RE}$**
- **Enhanced Slew-Rate Limiting Facilitates Error-Free Data Transmission (MAX13080E–MAX13085E/MAX13089E)**
- **Low-Current Shutdown Mode (Except MAX13081E/MAX13084E/MAX13087E)**
- **Pin-Selectable Full-/Half-Duplex Operation (MAX13089E)**
- **Phase Controls to Correct for Twisted-Pair Reversal (MAX13089E)**
- **Allow Up to 256 Transceivers on the Bus**
- **Available in Industry-Standard 8-Pin SO Package**

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	PKG CODE
MAX13080ECPD	0°C to +70°C	14 PDIP	P14-3
MAX13080ECSD	0°C to +70°C	14 SO	S14-2
MAX13080EEPD	-40°C to +85°C	14 PDIP	P14-3
MAX13080EESD	-40°C to +85°C	14 SO	S14-2
MAX13080EAPD	-40°C to +125°C	14 PDIP	P14-3
MAX13080EASD	-40°C to +125°C	14 SO	S14-2

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

(All Voltages Referenced to GND)
Supply Voltage (V_{CC}).....+6V
Control Input Voltage ($\overline{RE}$, DE, SLR, H/$\overline{F}$, TXP, RXP).....-0.3V to +6V
Driver Input Voltage (DI).....-0.3V to +6V
Driver Output Voltage (Z, Y, A, B).....-8V to +13V
Receiver Input Voltage (A, B).....-8V to +13V
Receiver Input Voltage
Full Duplex (A, B).....-8V to +13V
Receiver Output Voltage (RO).....-0.3V to (V_{CC} + 0.3V)
Driver Output Current.....±250mA

Continuous Power Dissipation (T_A = +70°C)
8-Pin SO (derate 5.88mW/°C above +70°C).....471mW
8-Pin Plastic DIP (derate 9.09mW/°C above +70°C).....727mW
14-Pin SO (derate 8.33mW/°C above +70°C).....667mW
14-Pin Plastic DIP (derate 10.0mW/°C above +70°C)...800mW
Operating Temperature Ranges
MAX1308_EC_ _.....0°C to +75°C
MAX1308_EE_ _.....-40°C to +85°C
MAX1308_EA_ _.....-40°C to +125°C
Junction Temperature.....+150°C
Storage Temperature Range.....-65°C to +150°C
Lead Temperature (soldering, 10s).....+300°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_{CC} = +5.0V ±10%, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted. Typical values are at V_{CC} = +5.0V and T_A = +25°C.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
DRIVER							
V_{CC} Supply-Voltage Range	V_{CC}			4.5		5.5	V
Differential Driver Output	V_{OD}	R_L = 100Ω (RS-422), Figure 1		3		V_{CC}	V
		R_L = 54Ω (RS-485), Figure 1		2		V_{CC}	
		No load				V_{CC}	
Change in Magnitude of Differential Output Voltage	ΔV_{OD}	R_L = 100Ω or 54Ω, Figure 1 (Note 2)				0.2	V
Driver Common-Mode Output Voltage	V_{OC}	R_L = 100Ω or 54Ω, Figure 1			V_{CC} / 2	3	V
Change in Magnitude of Common-Mode Voltage	ΔV_{OC}	R_L = 100Ω or 54Ω, Figure 1 (Note 2)				0.2	V
Input-High Voltage	V_{IH}	DE, DI, $\overline{RE}$, TXP, RXP, H/$\overline{F}$		3			V
Input-Low Voltage	V_{IL}	DE, DI, $\overline{RE}$, TXP, RXP, H/$\overline{F}$				0.8	V
Input Hysteresis	V_{HYS}	DE, DI, $\overline{RE}$, TXP, RXP, H/$\overline{F}$			100		mV
Input Current	I_{IN1}	DE, DI, $\overline{RE}$				±1	µA
Input Impedance First Transition		DE		1		10	kΩ
Input Current	I_{IN2}	TXP, RXP, H/$\overline{F}$ internal pulldown		10		40	µA
SRL Input-High Voltage				V_{CC} - 0.4			V
SRL Input-Middle Voltage				V_{CC} x 0.3		V_{CC} x 0.7	V
SRL Input-Low Voltage						0.4	V
SRL Input Current		SRL = V_{CC}				75	µA
		SRL = GND		-75			
Output Leakage (Y and Z) Full Duplex	I_O	DE = GND, V_{CC} = GND or V_{CC}	V_{IN} = +12V			125	µA
			V_{IN} = -7V	-100			

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

(V_{CC} = +5.0V ±10%, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted. Typical values are at V_{CC} = +5.0V and T_A = +25°C.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Driver Short-Circuit Output Current	I_{OSD}	$0 \le V_{OUT} \le +12V$ (Note 3)		40		250	mA
		$-7V \le V_{OUT} \le V_{CC}$ (Note 3)		-250		-40	
		$0 \le V_{OUT} \le +12V$, $+85°C \le T_A \le +125°C$ (Note 3)		40		270	
		$-7V \le V_{OUT} \le V_{CC}$, $+85°C \le T_A \le +125°C$ (Note 3)		-270		-40	
Driver Short-Circuit Foldback Output Current	I_{OSDF}	$(V_{CC} - 1V) \le V_{OUT} \le +12V$ (Note 3)		20			mA
		$-7V \le V_{OUT} \le +1V$ (Note 3)				-20	
Thermal-Shutdown Threshold	T_{TS}				175		°C
Thermal-Shutdown Hysteresis	T_{TSH}				15		°C
Input Current (A and B)	$I_{A, B}$	DE = GND, V_{CC} = GND or V_{CC}	V_{IN} = +12V			125	µA
			V_{IN} = -7V	-100			
RECEIVER							
Receiver Differential Threshold Voltage	V_{TH}	$-7V \le V_{CM} \le +12V$		-200	-125	-50	mV
Receiver Input Hysteresis	ΔV_{TH}	$V_A + V_B = 0$			15		mV
RO Output-High Voltage	V_{OH}	I_O = -1mA		V_{CC} - 0.6			V
RO Output-Low Voltage	V_{OL}	I_O = 1mA				0.4	V
Three-State Output Current at Receiver	I_{OZR}	$0 \le V_O \le V_{CC}$				± 1	µA
Receiver Input Resistance	R_{IN}	$-7V \le V_{CM} \le +12V$		96			kΩ
Receiver Output Short-Circuit Current	I_{OSR}	$0V \le V_{RO} \le V_{CC}$				±110	mA
SUPPLY CURRENT							
Supply Current	I_{CC}	No load, $\overline{RE}$ = 0, DE = V_{CC}			1.2	1.8	mA
		No load, $\overline{RE}$ = V_{CC}, DE = V_{CC}			1.2	1.8	
		No load, $\overline{RE}$ = 0, DE = 0			1.2	1.8	
Supply Current in Shutdown Mode	I_{SHDN}	$\overline{RE}$ = V_{CC}, DE = GND			2.8	10	µA
ESD PROTECTION							
ESD Protection for Y, Z, A, and B		Human Body Model			±15		kV
		Contact Discharge IEC 61000-4-2			±6		kV

DRIVER SWITCHING CHARACTERISTICS
MAX13086E/MAX13087E/MAX13088E/MAX13089E WITH SRL = GND (16Mbps)

(V_{CC} = +5.0V ±10%, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted. Typical values are at V_{CC} = +5.0V and T_A = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Driver Propagation Delay	t_{DPLH}	C_L = 50pF, R_L= 54Ω, Figures 2 and 3			50	ns
	t_{DPHL}				50	
Driver Differential Output Rise or Fall Time	t_R , t_F	C_L = 50pF, R_L= 54Ω, Figures 2 and 3			15	ns
Differential Driver Output Skew $\lvert t_{DPLH} - t_{DPHL} \rvert$	t_{DSKEW}	C_L = 50pF, R_L= 54Ω, Figures 2 and 3			8	ns
Maximum Data Rate			16			Mbps
Driver Enable to Output High	t_{DZH}	Figure 4			150	ns
Driver Enable to Output Low	t_{DZL}	Figure 5			150	ns
Driver Disable Time from Low	t_{DLZ}	Figure 5			100	ns
Driver Disable Time from High	t_{DHZ}	Figure 4			100	ns
Driver Enable from Shutdown to Output High	$t_{DZH(SHDN)}$	Figure 4			2200	ns
Driver Enable from Shutdown to Output Low	$t_{DZL(SHDN)}$	Figure 5			2200	ns
Time to Shutdown	t_{SHDN}		50	340	700	ns

RECEIVER SWITCHING CHARACTERISTICS
MAX13086E/MAX13087E/MAX13088E/MAX13089E WITH SRL = GND (16Mbps)

(V_{CC} = +5.0V ±10%, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted. Typical values are at V_{CC} = +5.0V and T_A = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Receiver Propagation Delay	t_{RPLH}	C_L = 15pF, Figures 6 and 7		50	80	ns
	t_{RPHL}			50	80	
Receiver Output Skew $\lvert t_{RPLH} - t_{RPHL} \rvert$	t_{RSKEW}	C_L = 15pF, Figures 6 and 7			13	ns
Maximum Data Rate			16			Mbps
Receiver Enable to Output Low	t_{RZL}	Figure 8			50	ns
Receiver Enable to Output High	t_{RZH}	Figure 8			50	ns
Receiver Disable Time from Low	t_{RLZ}	Figure 8			50	ns
Receiver Disable Time from High	t_{RHZ}	Figure 8			50	ns
Receiver Enable from Shutdown to Output High	$t_{RZH(SHDN)}$	Figure 8			2200	ns
Receiver Enable from Shutdown to Output Low	$t_{RZL(SHDN)}$	Figure 8			2200	ns
Time to Shutdown	t_{SHDN}		50	340	700	ns

Note 1: All currents into the device are positive. All currents out of the device are negative. All voltages are referred to device ground, unless otherwise noted.

Note 2: ΔV_{OD} and ΔV_{OC} are the changes in V_{OD} and V_{OC}, respectively, when the DI input changes state.

Note 3: The short-circuit output current applies to peak current just prior to foldback current limiting. The short-circuit foldback output current applies during current limiting to allow a recovery from bus contention.

PIN					NAME	FUNCTION
MAX13080E MAX13083E MAX13086E	MAX13081E MAX13084E MAX13087E	MAX13082E MAX13085E MAX13088E	MAX13089E			
FULL-DUPLEX DEVICES		HALF-DUPLEX DEVICES	FULL-DUPLEX MODE	HALF-DUPLEX MODE		
1, 8, 13	—	—	—	—	N.C.	No Connect. Not internally connected, can be connected to GND.
—	—	—	1	1	H/$\overline{F}$	Half-/Full-Duplex Select Input. Connect H/$\overline{F}$ to V_{CC} for half-duplex mode; connect H/$\overline{F}$ to GND or leave unconnected for full-duplex mode.
2	2	1	2	2	RO	Receiver Output. When $\overline{RE}$ is low and if (A - B) ≥ -50mV, RO is high; if (A - B) ≤ -200mV, RO is low.
3	—	2	3	3	$\overline{RE}$	Receiver Output Enable. Drive $\overline{RE}$ low to enable RO; RO is high impedance when $\overline{RE}$ is high. Drive $\overline{RE}$ high and DE low to enter low-power shutdown mode. $\overline{RE}$ is a hot-swap input (see the *Hot-Swap Capability* section for details).
4	—	3	4	4	DE	Driver Output Enable. Drive DE high to enable driver outputs. These outputs are high impedance when DE is low. Drive $\overline{RE}$ high and DE low to enter low-power shutdown mode. DE is a hot-swap input (see the *Hot-Swap Capability* section for details).
5	3	4	5	5	DI	Driver Input. With DE high, a low on DI forces noninverting output low and inverting output high. Similarly, a high on DI forces noninverting output high and inverting output low.
—	—	—	6	6	SRL	Slew-Rate Limit Selector Input. Connect SRL to ground for 16Mbps communication rate; connect SRL to V_{CC} for 500kbps communication rate. Leave SRL unconnected for 250kbps communication rate.
6, 7	4	5	7	7	GND	Ground
—	—	—	8	8	TXP	Transmitter Phase. Connect TXP to ground or leave TXP floating for normal transmitter phase/polarity. Connect TXP to V_{CC} to invert the transmitter phase/polarity.
9	5	—	9	—	Y	Noninverting Driver Output
—	—	—	—	9	Y	Noninverting Driver Output and Noninverting Receiver Input*
10	6	—	10	—	Z	Inverting Driver Output
—	—	—	—	10	Z	Inverting Driver Output and Inverting Receiver Input*
11	7	—	11	—	B	Inverting Receiver Input
—	—	—	—	11	B	Receiver Input Resistors*
—	—	7	—	—	B	Inverting Receiver Input and Inverting Driver Output
12	8	—	12	—	A	Noninverting Receiver Input
—	—	—	—	12	A	Receiver Input Resistors*
—	—	6	—	—	A	Noninverting Receiver Input and Noninverting Driver Output
—	—	—	13	13	RXP	Receiver Phase. Connect RXP to GND or leave RXP unconnected for normal transmitter phase/polarity. Connect RXP to V_{CC} to invert receiver phase/polarity.
14	1	8	14	14	V_{CC}	Positive Supply V_{CC} = +5.0V ±10%. Bypass V_{CC} to GND with a 0.1µF capacitor.

Tabla 59. Descripción de pines de entrada salida del transceptor RS485 MAX13088E.

TRANSMITTING				
INPUTS			OUTPUTS	
$\overline{RE}$	DE	DI	B/Z	A/Y
X	1	1	0	1
X	1	0	1	0
0	0	X	High-Z	High-Z
1	0	X	Shutdown	

RECEIVING			
INPUTS			OUTPUTS
$\overline{RE}$	DE	A-B	RO
0	X	≥ -50mV	1
0	X	≤ -200mV	0
0	X	Open/ shorted	1
1	1	X	High-Z
1	0	X	Shutdown

Tabla 60. Tablas de funciones del transceptor RS485 MAX13088E.

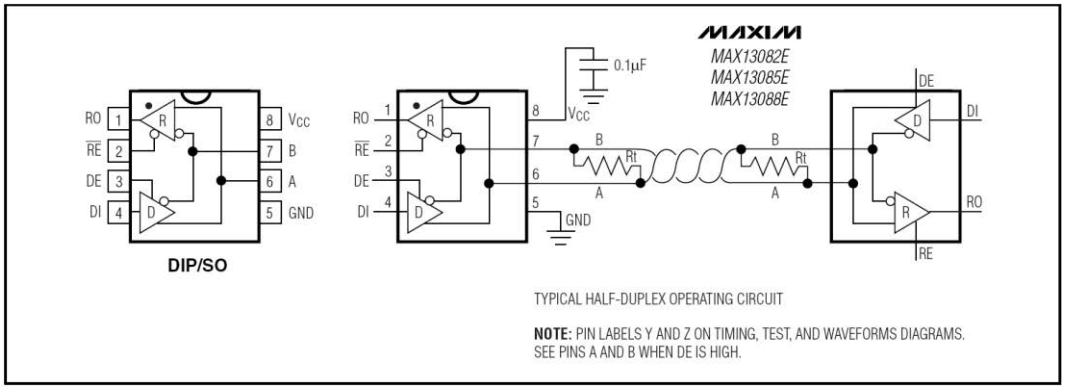


Ilustración 163. Configuración y circuito típico de funcionamiento del transceptor RS485 MAX13088E.

12.3.3. Optoacoplador MOC3041

Features

- Simplifies logic control of 115 VAC power
- Zero voltage crossing
- dv/dt of 2000 V/µs typical, 1000 V/µs guaranteed
- VDE recognized (File # 94766), ordering option V (e.g., MOC3043VM)

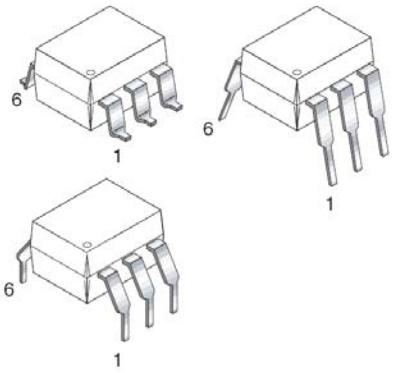
Applications

- Solenoid/valve controls
- Static power switches
- Temperature controls
- AC motor starters
- Lighting controls
- AC motor drives
- E.M. contactors
- Solid state relays

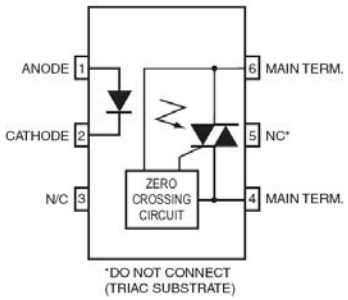
Description

The MOC303XM and MOC304XM devices consist of a AlGaAs infrared emitting diode optically coupled to a monolithic silicon detector performing the function of a zero voltage crossing bilateral triac driver.

They are designed for use with a triac in the interface of logic systems to equipment powered from 115 VAC lines, such as teletypewriters, CRTs, solid-state relays, industrial controls, printers, motors, solenoids and consumer appliances, etc.



Schematic



Absolute Maximum Ratings (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Parameters	Symbol	Device	Value	Units
TOTAL DEVICE				
Storage Temperature	T_{STG}	All	-40 to +150	°C
Operating Temperature	T_{OPR}	All	-40 to +85	°C
Lead Solder Temperature	T_{SOL}	All	260 for 10 sec	°C
Junction Temperature Range	T_J	All	-40 to +100	°C
Isolation Surge Voltage(1) (peak AC voltage, 60Hz, 1 sec duration)	V_{ISO}	All	7500	Vac(pk)
Total Device Power Dissipation @ 25°C	P_D	All	250	mW
Derate above 25°C			2.94	mW/°C
EMITTER				
Continuous Forward Current	I_F	All	60	mA
Reverse Voltage	V_R	All	6	V
Total Power Dissipation 25°C Ambient	P_D	All	120	mW
Derate above 25°C			1.41	mW/°C
DETECTOR				
Off-State Output Terminal Voltage	V_{DRM}	MOC3031M/2M/3M	250	V
		MOC3041M/2M/3M	400	
Peak Repetitive Surge Current (PW = 100 µs, 120 pps)	I_{TSM}	All	1	A
Total Power Dissipation @ 25°C Ambient	P_D	All	150	mW
Derate above 25°C		All	1.76	mW/°C

Note

1. Isolation surge voltage, V_{ISO}, is an internal device dielectric breakdown rating. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.

Electrical Characteristics (T_A = 25°C Unless otherwise specified)

Individual Component Characteristics

Parameters	Test Conditions	Symbol	Device	Min	Typ	Max	Units
EMITTER							
Input Forward Voltage	I_F = 30 mA	V_F	All		1.25	1.5	V
Reverse Leakage Current	V_R = 6 V	I_R	All		0.01	100	µA
DETECTOR							
Peak Blocking Current, Either Direction	Rated V_{DRM}, I_F = 0 (note 1)	I_{DRM1}	All			100	nA
Peak On-State Voltage, Either Direction	I_{TM} = 100 mA peak, I_F = 0	V_{TM}	All		1.8	3	V
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage	I_F = 0 (Figure 9, note 3)	dv/dt	All	1000			V/µs

Transfer Characteristics (T_A = 25°C Unless otherwise specified.)

DC Characteristics	Test Conditions	Symbol	Device	Min	Typ	Max	Units
LED Trigger Current	Main terminal voltage = 3V (note 2)	I_{FT}	MOC3031M/ MOC3041M			15	mA
			MOC3032M/ MOC3042M			10	
			MOC3033M/ MOC3043M			5	
Holding Current, Either Direction		I_H	All		400		µA

Zero Crossing Characteristics (T_A = 25°C Unless otherwise specified.)

Characteristics	Test Conditions	Symbol	Device	Min	Typ	Max	Units
Inhibit Voltage	I_F = rated I_{FT}, MT1-MT2 voltage above which device will not trigger off-state	V_{IH}	All			20	V
Leakage in Inhibited State	I_F = rated I_F , rated V_{DRM}, off-state	I_{DRM2}	All			500	µA

Note

1. Test voltage must be applied within dv/dt rating.
2. All devices are guaranteed to trigger at an I_F value less than or equal to max I_{FT}. Therefore, recommended operating I_F lies between max I_{FT} (15 mA for MOC3031M & MOC3041M, 10 mA for MOC3032M & MOC3042M, 5 mA for MOC3033M & MOC3043M) and absolute max I_F (60 mA).
3. This is static dv/dt. See Figure 9 for test circuit. Commutating dv/dt is a function of the load-driving thyristor(s) only.

12.3.4. Optoacoplador PC817

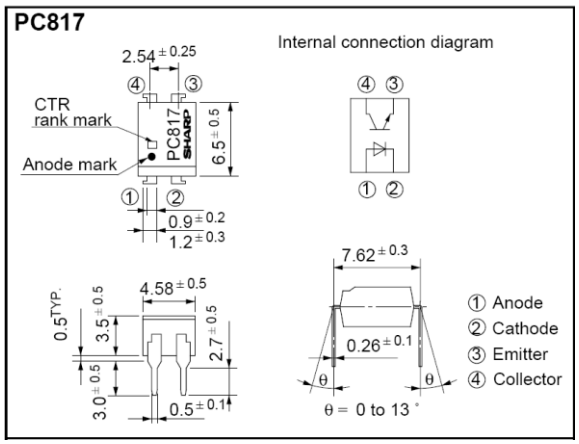
■ Features

1. Current transfer ratio
   (CTR: MIN. 50% at I_F = 5mA ,V_{CE}=5V)
2. High isolation voltage between input and output (V_{iso}: 5 000V $_{rms}$)
3. Compact dual-in-line package
   PC817: 1-channel type
   PC827: 2-channel type
   PC837: 3-channel type
   PC847: 4-channel type
4. Recognized by UL, file No. E64380

■ Applications

1. Computer terminals
2. System appliances, measuring instruments
3. Registers, copiers, automatic vending machines
4. Electric home appliances, such as fan heaters, etc.
5. Signal transmission between circuits of different potentials and impedances

■ Outline Dimensions



■ Absolute Maximum Ratings (Ta= 25°C)

Parameter		Symbol	Rating	Unit
Input	Forward current	I_F	50	mA
	*1Peak forward current	I_{FM}	1	A
	Reverse voltage	V_R	6	V
	Power dissipation	P	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	V_{CEO}	35	V
	Emitter-collector voltage	V_{ECO}	6	V
	Collector current	I_C	50	mA
	Collector power dissipation	P_C	150	mW
Total power dissipation		P_{tot}	200	mW
*2Isolation voltage		V_{iso}	5 000	V_{rms}
Operating temperature		T_{opr}	- 30 to + 100	°C
Storage temperature		T_{stg}	- 55 to + 125	°C
*3Soldering temperature		T_{sol}	260	°C

*1 Pulse width <=100μs, Duty ratio : 0.001
*2 40 to 60% RH, AC for 1 minute
*3 For 10 seconds

■ Electro-optical Characteristics (Ta= 25°C)

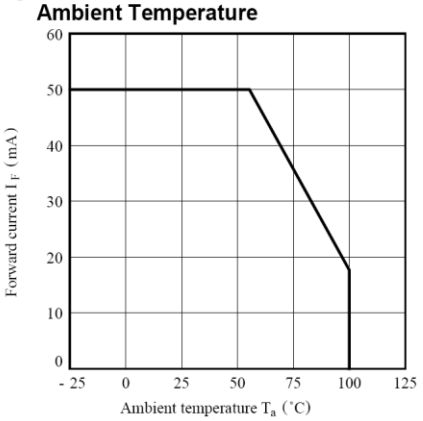
Parameter			Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Input	Forward voltage		V_F	I_F = 20mA	-	1.2	1.4	V
	Peak forward voltage		V_{FM}	I_{FM} = 0.5A	-	-	3.0	V
	Reverse current		I_R	V_R = 4V	-	-	10	μA
	Terminal capacitance		C_t	V = 0, f= 1kHz	-	30	250	pF
Output	Collector dark current		I_{CEO}	V_{CE} = 20V	-	-	10^{-7}	A
Transfer characteristics	*4Current transfer ratio		CTR	I_F = 5mA, V_{CE} = 5V	50	-	600	%
	Collector-emitter saturation voltage		$V_{CE(sat)}$	I_F = 20mA, I_C = 1mA	-	0.1	0.2	V
	Isolation resistance		R_{ISO}	DC500V, 40 to 60% RH	5×10^{10}	10^{11}	-	Ω
	Floating capacitance		C_f	V = 0, f= 1MHz	-	0.6	1.0	pF
	Cut-off frequency		f_c	V_{CE} = 5V, I_C = 2mA, R_L = 100Ω, - 3dB	-	80	-	kHz
	Response time	Rise time	t_r	V_{CE} = 2V, I_C = 2mA, R_L = 100Ω	-	4	18	μs
		Fall time	t_f		-	3	18	μs

*4 Classification table of current transfer ratio is shown below.

Model No.	Rank mark	CTR (%)
PC817A	A	80 to 160
PC817B	B	130 to 260
PC817C	C	200 to 400
PC817D	D	300 to 600
PC8❋7AB	A or B	80 to 260
PC8❋7BC	B or C	130 to 400
PC8❋7CD	C or D	200 to 600
PC8❋7AC	A, B or C	80 to 400
PC8❋7BD	B, C or D	130 to 600
PC8❋7AD	A, B, C or D	80 to 600
PC8❋7	A, B, C, D or No mark	50 to 600

❋ : 1 or 2 or 3 or 4

Fig. 1 Forward Current vs. Ambient Temperature



12.3.5. Sensor de iluminación BH1750FVI

●Descriptions

BH1750FVI is an digital Ambient Light Sensor IC for I^2C bus interface. This IC is the most suitable to obtain the ambient light data for adjusting LCD and Keypad backlight power of Mobile phone. It is possible to detect wide range at High resolution. (1 - 65535 lx).

●Features

1) I^2C bus Interface (f / s Mode Support)
2) Spectral responsibility is approximately human eye response
3) Illuminance to Digital Converter
4) Wide range and High resolution. (1 - 65535 lx)
5) Low Current by power down function
6) 50Hz / 60Hz Light noise reject-function
7) 1.8V Logic input interface
8) No need any external parts
9) Light source dependency is little. (ex. Incandescent Lamp. Fluorescent Lamp. Halogen Lamp. White LED. Sun Light)
10) It is possible to select 2 type of I^2C slave-address.
11) Adjustable measurement result for influence of optical window
    (It is possible to detect min. 0.11 lx, max. 100000 lx by using this function.)
12) Small measurement variation (+/- 20%)
13) The influence of infrared is very small.

●Applications

Mobile phone, LCD TV, NOTE PC, Portable game machine, Digital camera, Digital video camera, PDA, LCD display

●Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Ratings	Units
Supply Voltage	Vmax	4.5	V
Operating Temperature	Topr	-40～85	℃
Storage Temperature	Tstg	-40～100	℃
SDA Sink Current	Imax	7	mA
Power Dissipation	Pd	260※	mW

※ 70mm × 70mm × 1.6mm glass epoxy board. Derating in done at 3.47mW/℃ for operating above Ta=25℃.

●Operating Conditions

Parameter	Symbol	Ratings			Units
		Min.	Typ.	Max.	
Vcc Voltage	Vcc	2.4	3.0	3.6	V
I^2C Reference Voltage	VDVI	1.65	-	Vcc	V

●**Electrical Characteristics (Vcc = 3.0V, DVI = 3.0V, Ta = 25℃, unless otherwise noted)**

Parameter	Symbol	Limits			Units	Conditions
		Min.	Typ.	Max.		
Supply Current	Icc1	–	120	190	μA	Ev = 100 lx ※1
Powerdown Current	Icc2	–	0.01	1.0	μA	No input Light
Peak Wave Length	λp	–	560	–	nm	
Measurement Accuracy	S/A	0.96	1.2	1.44	times	Sensor out / Actual lx EV = 1000 lx ※1, ※2
Dark (0 lx) Sensor out	S0	0	0	3	count	H-Resolution Mode ※3
H-Resolution Mode Resolution	rHR	–	1	–	lx	
L-Resolution Mode Resolution	rLR	–	4	–	lx	
H-Resolution Mode Measurement Time	tHR	–	120	180	ms	
L-Resolution Mode Measurement Time	tLR	–	16	24	ms	
Incandescent / Fluorescent Sensor out ratio	rIF	–	1	–	times	EV = 1000 lx
ADDR Input 'H' Voltage	VAH	0.7 * VCC	–	–	V	
ADDR Input 'L' Voltage	VAL	–	–	0.3 * VCC	V	
DVI Input 'L' Voltage	VDVL	–	–	0.4	V	
SCL, SDA Input 'H' Voltage 1	VIH1	0.7 * DVI	–	–	V	DVI ≧ 1.8V
SCL, SDA Input 'H' Voltage 2	VIH2	1.26	–	–	V	1.65V ≦ DVI <1.8V
SCL, SDA Input 'L' Voltage 1	VIL1	–	–	0.3 * DVI	V	DVI ≧ 1.8V
SCL, SDA Input 'L' Voltage 2	VIL2	–	–	DVI – 1.26	V	1.65V ≦ DVI < 1.8V
SCL, SDA, ADDR Input 'H' Current	IIH	–	–	10	μA	
SCL, SDA, ADDR Input 'L' Current	IIL	–	–	10	μA	
I^2C SCL Clock Frequency	fSCL	–	–	400	kHz	
I^2C Bus Free Time	tBUF	1.3	–	–	μs	
I^2C Hold Time (repeated) START Condition	tHDSTA	0.6	–	–	μs	
I^2C Set up time for a Repeated START Condition	tSUSTA	0.6	–	–	μs	
I^2C Set up time for a Repeated STOP Condition	tSUSTD	0.6	–	–	μs	
I^2C Data Hold Time	tHDDAT	0	–	0.9	μs	
I^2C Data Setup Time	tSUDAT	100	–	–	ns	
I^2C 'L' Period of the SCL Clock	tLOW	1.3	–	–	μs	
I^2C 'H' Period of the SCL Clock	tHIGH	0.6	–	–	μs	
I^2C SDA Output 'L' Voltage	VOL	0	–	0.4	V	IOL = 3 mA

※1 White LED is used as optical source.
※2 Measurement Accuracy typical value is possible to change '1' by "Measurement result adjustment function".
※3 Use H-resolution mode or H-resolution mode2 if dark data (less than 10 lx) is need.

●Reference Data

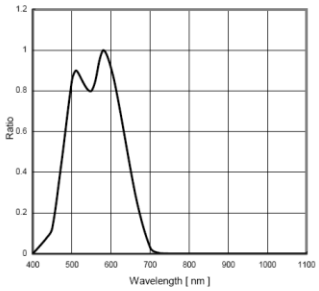


Fig.1 Spectral Response

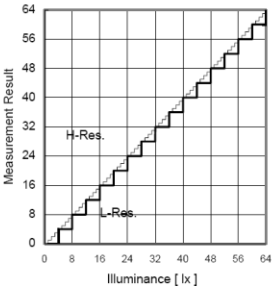


Fig.2 Illuminance - Measurement Result 1

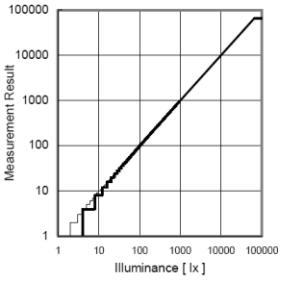


Fig.3 Illuminance - Measuremnet Result 2

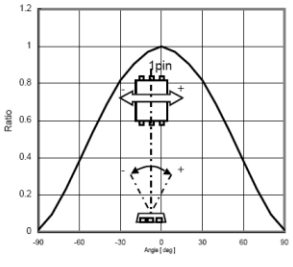


Fig.4 Directional Characteristics 1

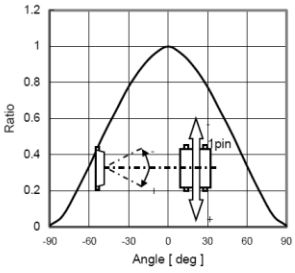


Fig.5 Directional Characteristics 2

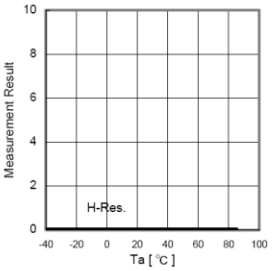


Fig.6 Dark Response

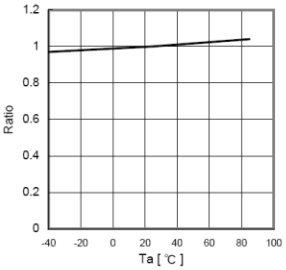


Fig.7 Measurement Accuracy Temperature Dependency

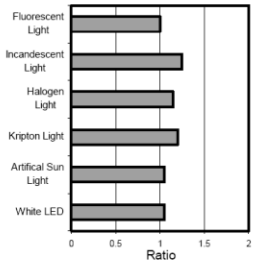


Fig.8 Light Source Dependency (Fluorescent Light is set to '1')

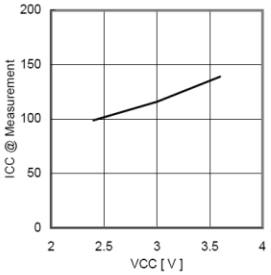


Fig.9 VCC - ICC (During measurement)

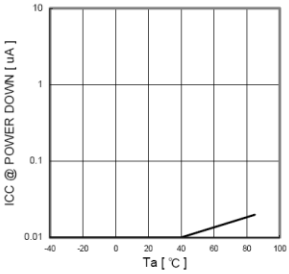


Fig.10 VCC – ICC@0 Lx (POWER DOWN)

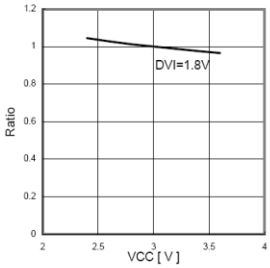


Fig.11 Measurement Result VCC Dependency

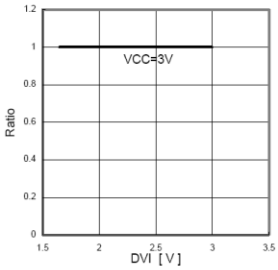
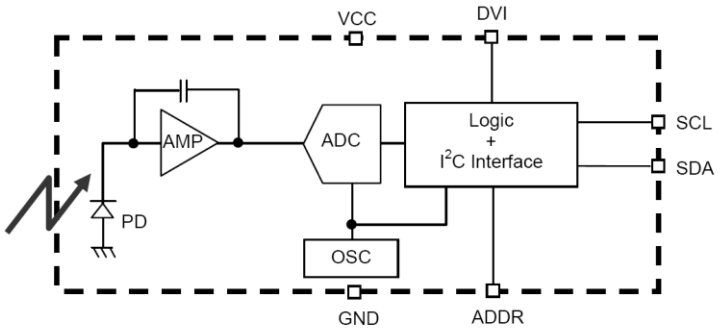


Fig.12 Measurement Result DVI Dependency

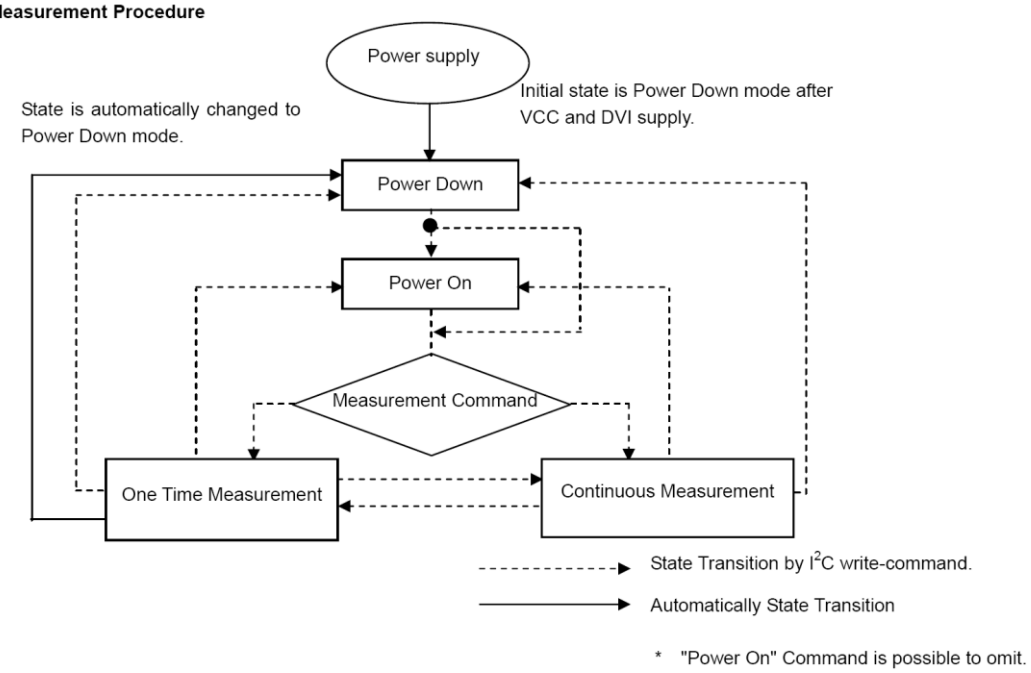
●Block Diagram



●Block Diagram Descriptions

・PD
Photo diode with approximately human eye response.
・AMP
Integration-OPAMP for converting from PD current to Voltage.
・ADC
AD converter for obtainment Digital 16bit data.
・Logic + I^2C Interface
Ambient Light Calculation and I^2C BUS Interface. It is including below register.
Data Register → This is for registration of Ambient Light Data. Initial Value is "0000_0000_0000_0000".
Measurement Time Register → This is for registration of measurement time. Initial Value is "0100_0101".
・OSC
Internal Oscillator (typ. 320kHz). It is CLK for internal logic.

●Measurement Procedure



●**Instruction Set Architecture**

Instruction	Opecode	Comments
Power Down	0000_0000	No active state.
Power On	0000_0001	Waiting for measurement command.
Reset	0000_0111	Reset Data register value. Reset command is not acceptable in Power Down mode.
Continuously H-Resolution Mode	0001_0000	Start measurement at 1lx resolution. Measurement Time is typically 120ms.
Continuously H-Resolution Mode2	0001_0001	Start measurement at 0.5lx resolution. Measurement Time is typically 120ms.
Continuously L-Resolution Mode	0001_0011	Start measurement at 4lx resolution. Measurement Time is typically 16ms.
One Time H-Resolution Mode	0010_0000	Start measurement at 1lx resolution. Measurement Time is typically 120ms. It is automatically set to Power Down mode after measurement.
One Time H-Resolution Mode2	0010_0001	Start measurement at 0.5lx resolution. Measurement Time is typically 120ms. It is automatically set to Power Down mode after measurement.
One Time L-Resolution Mode	0010_0011	Start measurement at 4lx resolution. Measurement Time is typically 16ms. It is automatically set to Power Down mode after measurement.
Change Measurement time (High bit)	01000_MT[7,6,5]	Change measurement time. ※ Please refer "adjust measurement result for influence of optical window."
Change Masurement time (Low bit)	011_MT[4,3,2,1,0]	Change measurement time. ※ Please refer "adjust measurement result for influence of optical window."

※ Don't input the other opecode.

●Measurement mode explanation

Measurement Mode	Measurement Time.	Resolurtion
H-resolution Mode2	Typ. 120ms.	0.5 lx
H-Resolution Mode	Typ. 120ms.	1 lx.
L-Resolution Mode	Typ. 16ms.	4 lx.

We recommend to use H-Resolution Mode.
Measurement time (integration time) of H-Resolution Mode is so long that some kind of noise(including in 50Hz / 60Hz noise) is rejected. And H-Resolution Mode is 1 l x resolution so that it is suitable for darkness (less than 10 lx)
H-resolution mode2 is also suitable to detect for darkness.

●**Explanation of Asynchronous reset and Reset command "0000_0111"**

1) Asynchronous reset
All registers are reset. It is necessary on power supply sequence. Please refer "Timing chart for VCC and DVI power supply sequence" in this page. It is power down mode during DVI = 'L'.

2) Reset command
Reset command is for only reset Illuminance data register. (reset value is '0') It is not necessary even power supply sequence.It is used for removing previous measurement result. This command is not working in power down mode, so that please set the power on mode before input this command.

12.3.6. Sensor de temperatura y humedad SHT21

Product Summary

SHT21, the new humidity and temperature sensor of Sensirion is about to set new standards in terms of size and intelligence: Embedded in a reflow solderable Dual Flat No leads (DFN) package of 3 x 3mm foot print and 1.1mm height it provides calibrated, linearized signals in digital, true I²C format.

With a completely new designed CMOSens® chip, a reworked capacitive type humidity sensor and an improved band gap temperature sensor the performance has been lifted even beyond the outstanding level of the previous sensor generation (SHT1x and SHT7x). For example, measures have been taken to stabilize the behavior at high humidity levels.

Every sensor is individually calibrated and tested. Lot identification is printed on the sensor and an electronic identification code is stored on the chip – which can be read out by command. Furthermore, the resolution of SHT21 can be changed by command (8/12bit up to 12/14bit for RH/T), low battery can be detected and a checksum helps to improve communication reliability.

With made improvements and the miniaturization of the sensor the performance-to-price ratio has been improved – and eventually, any device should benefit from the cutting edge energy saving operation mode. For testing SHT21 a new evaluation Kit EK-H4 is available.

Dimensions

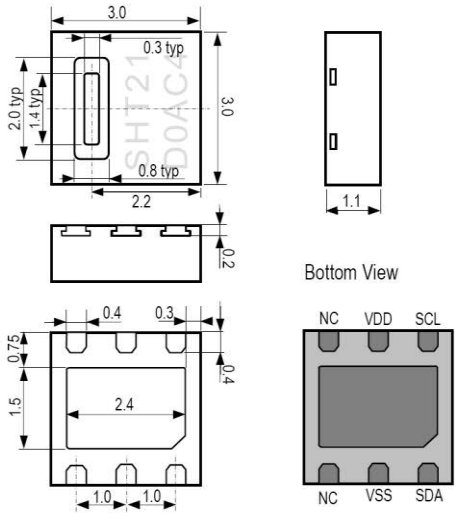


Figure 1: Drawing of SHT21 sensor package, dimensions are given in mm (1mm = 0.039inch), tolerances are ±0.1mm. NC and die pad (center pad) are internally connected to VSS. They may be left floating. VSS = GND, SDA = DATA. Numbering of E/O pads starts at lower right corner (indicated by notch in die pad) and goes clockwise (compare Table 2).

Sensor Chip

SHT21 features a generation 4C CMOSens® chip. Besides the capacitive relative humidity sensor and the band gap temperature sensor, the chip contains an amplifier, A/D converter, OTP memory and a digital processing unit.

Material Contents

While the sensor itself is made of Silicon the sensors' housing consists of a plated Cu lead-frame and green epoxy-based mold compound. The device is fully RoHS and WEEE compliant, e.g. free of Pb, Cd and Hg.

Additional Information and Evaluation Kits

Additional information such as Application Notes is available from the web page www.sensirion.com/sht21. For more information please contact Sensirion via info@sensirion.com.

For SHT21 two Evaluation Kits are available: EK-H4, a four-channel device with Viewer Software, that also serves for data-logging, and a simple EK-H5 directly connecting one sensor via USB port to a computer.

Sensor Performance

Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution [1]	12 bit		0.04		%RH
	8 bit		0.7		%RH
Accuracy tolerance [2]	typ		±2.0		%RH
	max	see Figure 2			%RH
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity			<0.1		%RH
Response time [3]	τ 63%		8		s
Operating Range	extended [4]	0		100	%RH
Long Term Drift [5]	normal		< 0.5		%RH/yr

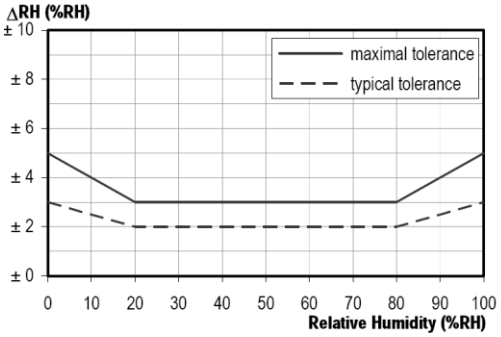


Figure 2 Typical and maximal tolerance at 25°C for relative humidity. For extensive information see Users Guide, Sect. 1.2.

Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution [1]	14 bit		0.01		°C
	12 bit		0.04		°C
Accuracy tolerance [2]	typ		±0.3		°C
	max	see Figure 3			°C
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range	extended [4]	-40		125	°C
		-40		257	°F
Response Time [7]	τ 63%	5		30	s
Long Term Drift			< 0.04		°C/yr

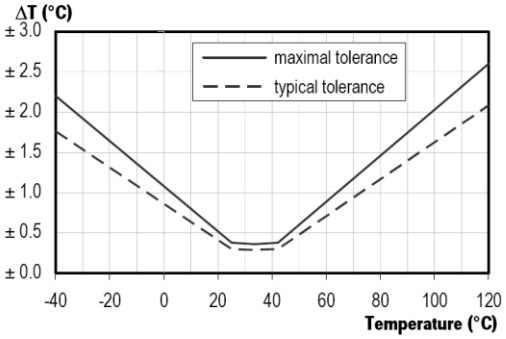


Figure 3 Maximal tolerance for temperature sensor in °C.

Electrical Specification

Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Supply Voltage, VDD		2.1	3.0	3.6	V
Supply Current, IDD [6]	sleep mode	-	0.15	0.4	µA
	measuring	270	300	330	µA
Power Dissipation [6]	sleep mode	-	0.5	1.2	µW
	measuring	0.8	0.9	1.0	mW
	average 8bit	-	3.2	-	µW
Heater	VDD = 3.0 V	5.5mW, ΔT = + 0.5-1.5°C			
Communication	digital 2-wire interface, true I²C protocol				

Table 1 Electrical specification. For absolute maximum values see Section 4.1 of Users Guide.

Packaging Information

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT21	Tape & Reel	400	1-100707-01
	Tape & Reel	1500	1-100645-01
	Tape & Reel	5000	1-100694-01

This datasheet is subject to change and may be amended without prior notice.

[1] Default measurement resolution is 14bit (temperature) / 12bit (humidity). It can be reduced to 12/8bit, 11/11bit or 13/10bit by command to user register.

[2] Accuracies are tested at Outgoing Quality Control at 25°C (77°F) and 3.0V. Values exclude hysteresis and long term drift and are applicable to non-condensing environments only.

[3] Time for achieving 63% of a step function, valid at 25°C and 1m/s airflow.

[4] Normal operating range: 0-80%RH, beyond this limit sensor may read a reversible offset with slow kinetics (<3%RH after 200hours at 90%RH). For more details please see Section 1.1 of the Users Guide.

[5] Value may be higher in environments with vaporized solvents, out-gassing tapes, adhesives, packaging materials, etc. For more details please refer to Handling Instructions.

[6] Min and max values of Supply Current and Power Dissipation are based on fixed VDD = 3.0V and T<60°C. The average value is based on one 8bit measurement per second.

[7] Response time depends on heat conductivity of sensor substrate.

Users Guide SHT2x

1 Extended Specification

For details on how Sensirion is specifying and testing accuracy performance please consult Application Note "Statement on Sensor Specification".

1.1 Operating Range

The sensor works stable within recommended Normal Range – see Figure 4. Long term exposure to conditions outside Normal Range, especially at humidity >80%RH, may temporarily offset the RH signal (+3%RH after 60h). After return into the Normal Range it will slowly return towards calibration state by itself. See Section 2.3 "Reconditioning Procedure" for eliminating the offset. Prolonged exposure to extreme conditions may accelerate ageing.

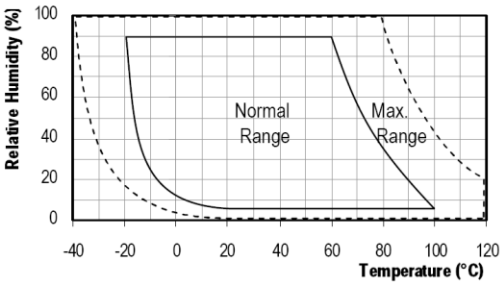


Figure 4 Operating Conditions

1.2 RH accuracy at various temperatures

Maximal tolerance for RH accuracy at 25°C is defined in Figure 2. For other temperatures maximal tolerance has been evaluated to be within limits displayed in Figure 5.

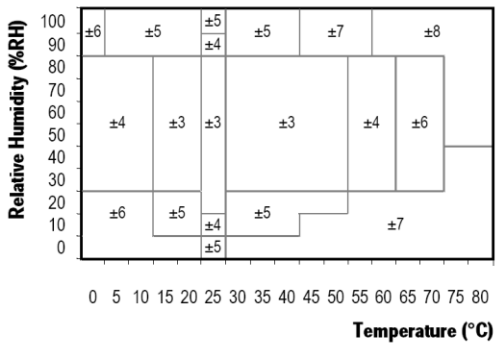


Figure 5 Maximal tolerance of relative humidity measurements given in %RH for temperatures 0 – 80°C.

Please note that above values are maximal tolerances (not including hysteresis) against a high precision reference such as a dew point mirror. Typical deviations are at ±2%RH where maximal tolerance is ±3%RH and about half the maximal tolerance at other values.

1.3 Electrical Specification

Current consumption as given in Table 1 is dependent on temperature and supply voltage VDD. For estimations on energy consumption of the sensor Figures 6 and 7 may be consulted. Please note that values given in these Figures are of typical nature and the variance is considerable.

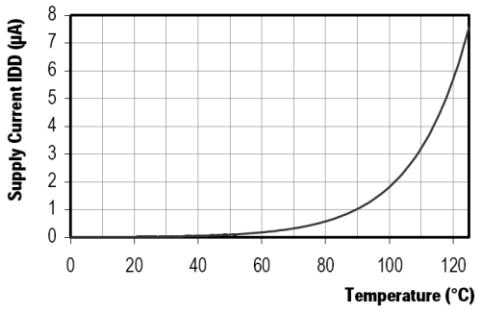


Figure 6 Typical dependency of supply current (sleep mode) versus temperature at VDD = 3.0V. Please note that the variance of these data is about ±25% of displayed value.

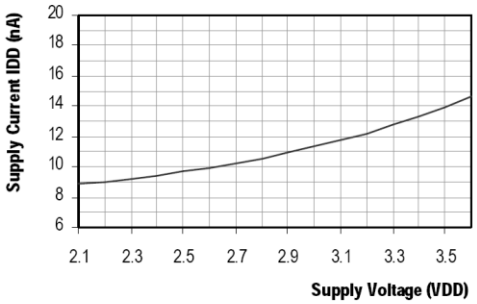


Figure 7 Typical dependency of supply current (sleep mode) versus supply voltage at 25°C. Please note that deviations may be up to ±50% of displayed value. Values at 60°C scale with a factor of about 15 (compare Table 1).

3 Interface Specifications

Pin	Name	Comment
1	SDA	Serial Data, bidirectional
2	VSS	Ground
5	VDD	Supply Voltage
6	SCL	Serial Clock, bidirectional
3,4	NC	Not Connected

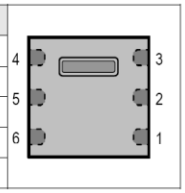


Table 2 SHT2x pin assignment, NC remain floating (top view)

3.1 Power Pins (VDD, VSS)

The supply voltage of SHT2x must be in the range of 2.1 – 3.6V, recommended supply voltage is 3.0V. Power supply pins Supply Voltage (VDD) and Ground (VSS) must be decoupled with a 100nF capacitor, that shall be placed as close to the sensor as possible – see Figure 11.

3.2 Serial clock (SCL)

SCL is used to synchronize the communication between microcontroller (MCU) and the sensor. Since the interface consists of fully static logic there is no minimum SCL frequency.

3.3 Serial SDA (SDA)

The SDA pin is used to transfer data in and out of the sensor. For sending a command to the sensor, SDA is valid on the rising edge of SCL and must remain stable while SCL is high. After the falling edge of SCL the SDA value may be changed. For safe communication SDA shall be valid t_{SU} and t_{HD} before the rising and after the falling edge of SCL, respectively – see Figure 12. For reading data from the sensor, SDA is valid t_{VD} after SCL has gone low and remains valid until the next falling edge of SCL.

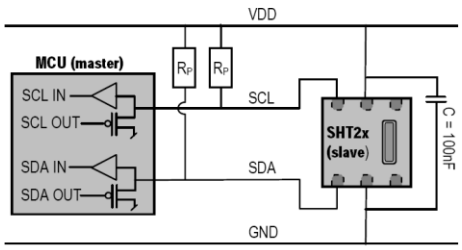


Figure 11 Typical application circuit, including pull-up resistors R_P and decoupling of VDD and VSS by a capacitor.

To avoid signal contention the micro-controller unit (MCU) must only drive SDA and SCL low. External pull-up resistors (e.g. 10kΩ), are required to pull the signal high. For the choice of resistor size please take bus capacity requirements into account (compare Table 5). It should be noted that pull-up resistors may be included in I/O circuits of MCUs. See Table 4 and Table 5 for detailed I/O characteristic of the sensor.

4 Electrical Characteristics

4.1 Absolute Maximum Ratings

The electrical characteristics of SHT2x are defined in Table 1. The absolute maximum ratings as given in Table 3 are stress ratings only and give additional information. Functional operation of the device at these conditions is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect the sensor reliability (e.g. hot carrier degradation, oxide breakdown).

Parameter	min	max	Units
VDD to VSS	-0.3	5	V
Digital I/O Pins (SDA, SCL) to VSS	-0.3	VDD + 0.3	V
Input Current on any Pin	-100	100	mA

Table 3 Electrical absolute maximum ratings

ESD immunity is qualified according to JEDEC JESD22-A114E method (Human Body Model at ±4kV), JEDEC JESD22-A115A method (Machine Model ±200V) and ESDA ESD-STM5.3.1-1999 and AEC-Q100-011 (Charged Device Model, 750V corner pins, 500V other pins). Latch-up immunity is provided at a force current of ±100mA with T_{amb} = 125°C according to JEDEC JESD78. For exposure beyond named limits the sensor needs additional protection circuit.

4.2 Input / Output Characteristics

The electrical characteristics such as power consumption, low and high level input and output voltages depend on the supply voltage. For proper communication with the sensor it is essential to make sure that signal design is strictly within the limits given in Table 4 & 5 and Figure 12.

Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Output Low Voltage, VOL	VDD = 3.0 V, -4 mA < IOL < 0mA	0	-	0.4	V
Output High Voltage, VOH		70% VDD	-	VDD	V
Output Sink Current, IOL		-	-	-4	mA
Input Low Voltage, VIL		0	-	30% VDD	V
Input High Voltage, VIH		70% VDD	-	VDD	V
Input Current	VDD = 3.6 V, VIN = 0 V to 3.6 V	-	-	±1	uA

Table 4 DC characteristics of digital input/output pads. VDD = 2.1V to 3.6V, T = -40°C to 125°C, unless otherwise noted.

12.3.7. Serial UART Interface Module DLP-USB232M

The DLP-USB232M uses FTDI's 2nd generation FT232BL (Lead-free) USB-UART chip that adds extra functionality to its predecessor (the FT8U232AM) and reduces external component count.

HARDWARE FEATURES

- Single Chip USB Asynchronous Serial Data Transfer
- Full Handshaking & Modem Interface Signals
- UART I/F Supports 7 / 8 Bit Data, 1 / 2 Stop Bits and Odd/Even/Mark/Space/No Parity
- Data rate 300 => 3M Baud (TLL)
- Data rate 300 => 1M Baud (RS232)
- Data rate 300 => 3M Baud (RS422/RS485)
- 384 Byte Receive Buffer / 128 Byte Transmit Buffer for high data throughput
- Adjustable RX buffer timeout
- Full hardware assisted hardware or X-On / X-Off handshaking
- In-built support for event characters and line break condition
- Auto Transmit Buffer control for RS485
- Support for USB Suspend / Resume through SLEEP# and RI# pins
- Support for high power USB Bus powered devices through PWREN# pin
- Integrated level converter on UART and control signals for interfacing to 5v and 3.3v logic
- Integrated 3.3v regulator for USB IO
- Integrated Power-On-Reset circuit
- Integrated 6MHz – 48Mhz clock multiplier PLL
- USB Bulk or Isocronous data transfer modes
- 4.4v to 5.25v single supply operation
- UHCI / OHCI / EHCI host controller compatible
- USB 1.1 and USB 2.0 compatible
- USB VID, PID , Serial Number and Product Description strings in external EEPROM
- EEPROM programmable on-board via USB

VIRTUAL COM PORT (VCP) DRIVERS for

- Windows 98 and Windows 98 SE
- Windows 2000 / ME / XP
- Windows CE **
- MAC OS-8 and OS-9
- MAC OS-X **
- Linux 2.40 and greater

D2XX (USB Direct Drivers + DLL S/W Interface)

- Windows 98 and Windows 98 SE
- Windows 2000 / ME / XP

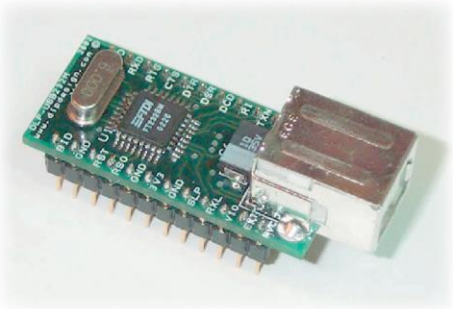
[** = In planning or under development]

APPLICATION AREAS

- USB - RS232 Converters
- USB - RS422 / RS485 Converters
- Upgrading RS232 Legacy Peripherals to USB
- Cellular and Cordless Phone USB data transfer cables and interfaces
- Interfacing MCU based designs to USB
- USB Audio and Low Bandwidth Video data transfer
- PDA - USB data transfer
- USB Smart Card Readers
- Set Top Box (S.T.B) PC - USB interface
- USB Hardware Modems
- USB Wireless Modems
- USB Instrumentation
- USB Bar Code Readers

ENHANCEMENTS

This section summarizes the enhancements of the 2nd generation silicon from FTDI compared to its FT8U232AM predecessor. For further details, consult the device pin-out description and functional descriptions.



• Integrated Level Converter on UART interface and control signals

The previous devices would drive the UART and control signals at 5v CMOS logic levels. The new device has a separate VCC-IO pin allowing the device to directly interface to 3.3v and other logic families without the need for external level converter i.c.'s.

• Improved Power Management control for USB Bus Powered, high current devices

The previous devices had a USBEN pin, which became active when the device was enumerated by USB. To provide power control, this signal had to be externally gated with SLEEP# and RESET#. This gating is now done on-chip. USBEN has now been replaced with the new PWREN# signal which can be used to directly drive a transistor or P-Channel MOSFET in applications where power switching of external circuitry is required. A new EEPROM based option makes the device pull gently down its UART interface lines when the power is shut off (PWREN# is High). In this mode, any residual voltage on external circuitry is bled to GND when power is removed thus ensuring that external circuitry controlled by PWREN# resets reliably when power is restored.

• Lower Suspend Current

Integration of RCCLK within the device and internal design improvements reduce the suspend current of the FT232BM to under 200uA (excluding the 1.5k pull-up on USB DP) in USB suspend mode. This allows greater margin for peripherals to meet the USB Suspend current limit of 500uA.

• Support for USB Isocronous Transfers

While USB Bulk transfer is usually the best choice for data transfer, the scheduling time of the data is not guaranteed. For applications where scheduling latency takes priority over data integrity such as transferring audio and low bandwidth video data, the new device now offers an option of USB Isocronous transfer via an option bit in the EEPROM.

• Programmable Receive Buffer Timeout

In the previous device, the receive buffer timeout used to flush remaining data from the receive buffer was fixed at 16ms timeout. This timeout is now programmable over USB in 1ms increments from 1ms to 255ms, thus allowing the device to be better optimized for protocols requiring faster response times from short data packets.

• TXDEN Timing fix

TXDEN timing has now been fixed to remove the external delay that was previously required for RS485 applications at high baud rates. TXDEN now works correctly during a transmit send-break condition.

• Improved PreScaler Granularity

The previous version of the Prescaler supported division by (n + 0), (n + 0.125), (n + 0.25) and (n + 0.5) where n is an integer between 2 and 16,384 (214). To these have been added (n + 0.375), (n + 0.625), (n + 0.75) and (n+ 0.875) which can be used to improve the accuracy of some baud rates and generate new baud rates which were previously impossible (especially with higher baud rates).

• PreScaler Divide By 1 Fix

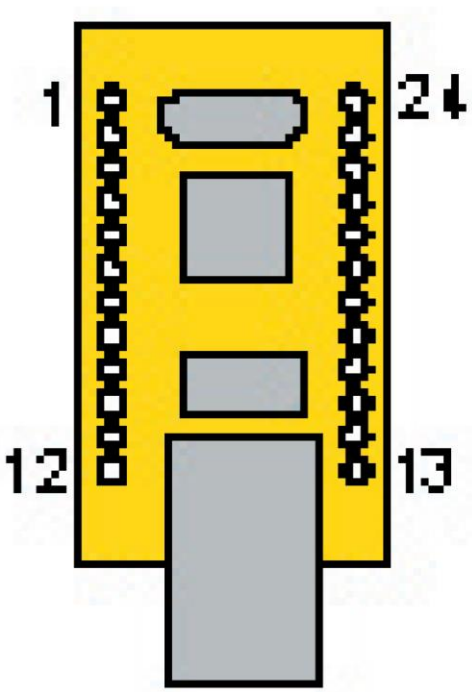
The previous device had a problem when the integer part of the divisor was set to 1. In the 2nd generation device, setting the prescaler value to 1 gives a baud rate of 2 million baud and setting it to zero gives a baud rate of 3 million baud. Non-integer division is not supported with divisor values of 0 and 1.

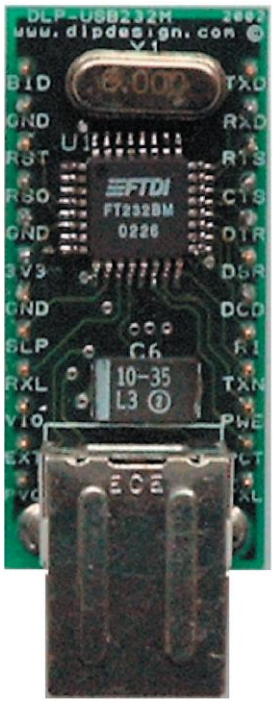
• Bit Bang Mode

The 2nd generation device has a new option referred to as “Bit Bang” mode. In Bit Bang mode, the eight UART interface control lines can be switched between UART interface mode and an 8-bit Parallel IO port. Data packets can be sent to the device and they will be sequentially sent to the interface at a rate controlled by the prescaler setting. As well as allowing the device to be used stand-alone as a general purpose IO controller for example controlling lights, relays and switches, some other interesting possibilities exist. For instance, it may be possible to connect the device to an SRAM configurable FPGA as supplied by vendors such as Altera and Xilinx. The FPGA device would normally be un-configured (i.e. have no defined function) at power-up.
Application software on the PC could use Bit Bang Mode to download configuration data to the FPGA which would define it’s hardware function, then after the FPGA device is configured the FT232BM can switch back into UART interface mode to allow the programmed FPGA device to communicate with the PC over USB. This approach allows a customer to create a “generic” USB peripheral whose hardware function can be defined under control of the application software. The FPGA based hardware can be easily upgraded or totally changed simply by changing the FPGA configuration data file. Application notes, software and development modules for this application area will be available from FTDI and other 3rd party developers.

• USB 2.0 (full speed option)

A new EEPROM based option allows the FT232BM to return a USB 2.0 device descriptor as opposed to USB 1.1. Note: The device would be a USB 2.0 Full Speed device (12Mb/s) as opposed to a USB 2.0 High Speed device (480Mb/s).





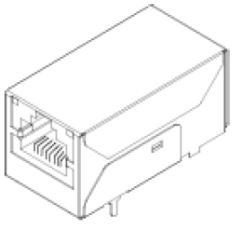
Pin#	Description
1	**BOARD ID** (Out) Identifies the board as either a DLP-USB245M or DLP-USB232M. High for DLP-USB232M and low for DLP-USB245M.
2	**Ground**
3	**RESET#** (In) Can be used by an external device to reset the FT245BM. If not required, this pin must be tied to VCC.
4	**RESETO#** (Out) Output of the internal Reset Generator. Stays high impedance for ~ 2ms after VCC > 3.5v and the internal clock starts up, then clamps it's output to the 3.3v output of the internal regulator. Taking RESET# low will also force RSTOUT# to go high impedance. RSTOUT# is NOT affected by a USB Bus Reset.
5	**Ground**
6	**3V3OUT** (Out) Output from the integrated L.D.O. regulator. It's primary purpose is to provide the internal 3.3v supply to the USB transceiver cell and the RSTOUT# pin. A small amount of current (<= 5mA) can be drawn from this pin to power external 3.3v logic if required.
7	**Ground**
8	**SLEEP#** (Out) Goes Low during USB suspend mode. Typically used to power-down an external TTL to RS232 level converter IC in USB-> RS232 converter designs.
9	**RXLED#** (O.C.) LED Drive - Pulses Low when Receiving Data via USB

10	**VCC-IO** (In) 3.0 volt to +5.25 volt VCC to the UART interface pins 10..12, 14..16 and 18..25. When interfacing with 3.3v external logic connect VCC-IO to the 3.3v supply of the external logic, otherwise connect to VCC to drive out at 5v CMOS level. This pin must be connected to VCC from the target electronics or EXTVCC.
11	**EXTVCC** – (In) Use for applying main power (4.4 to 5.25 Volts) to the module. Connect to PORTVCC if module is to be powered by the USB port (typical configuration)
12	**PORTVCC** - (Out) Power from USB port. Connect to EXTVCC if module is to be powered by the USB port (typical configuration). 500mA maximum current available to USB adapter and target electronics if USB device is configured for high power.
13	**TXLED#** - (O.C.) LED Drive - Pulses Low when Transmitting Data via USB
14	**PWRCTL** (IN) Bus Powered – Tie Low / Self Powered – Tie High
15	**POWEREN#** (OUT) Goes Low after the device is configured via USB, then high during USB suspend. Can be used to control power to external logic using a P-Channel Logic Level MOSFET switch. Enable the Interface Pull-Down Option in EEPROM when using the PWREN# pin in this way.
16	**TXDEN** (OUT) Enable Transmit Data for RS485
17	**RI#** (IN) Ring Indicator Control Input. When the Remote Wakeup option is enabled in the EEPROM, taking RI# low can be used to resume the PC USB Host controller from suspend.
18	**DCD#** (IN)Data Carrier Detect Control Input
19	**DSR#** (IN)Data Set Ready Control Input / Handshake signal
20	**DTR#** (OUT)Data Terminal Ready Control Output / Handshake signal
21	**CTS#** (IN) Clear To Send Control Input / Handshake signal
22	**RTS#** (OUT) Request To Send Control Output / Handshake signal
23	**RXD** (IN) Receive Asynchronous Data Input
24	**TXD** (OUT)Transmit Asynchronous Data Output

These are the absolute maximum ratings for the DLP-USB232M module in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134). Exceeding these may cause permanent damage to the device.

- Storage Temperature ..... –65°C to + 150°C
- Ambient Temperature (Power Applied)..... 0°C to + 70°C
- VCC Supply Voltage ..... -0.5v to +6.00v
- DC Input Voltage - Inputs ..... -0.5v to VCC + 0.5v
- DC Input Voltage - High Impedance Bidirectionals ..... -0.5v to VCC + 0.5v
- DC Output Current – Outputs 24mA
- DC Output Current – Low Impedance Bidirectionals 24mA
- Power Dissipation (VCC = 5.25v) 500mW
- Electrostatic Discharge Voltage (I < 1uA) ..... +/- 2000v
- Latch Up Current (Vi < 0 or Vi > Vcc) 100mA

12.3.8. Pasarela Ethernet-Serie DIGI Connect ME

Digi Connect ME Modules		
Model	**Description**	**Figure**
Digi Connect ME DC-ME-01T-S DC-ME4-01T-S DC-ME-01T-C DC-ME4-01T-C DC-ME-01T-CLI DC-ME4-01T-CLI DC-ME-01T-MF DC-ME-01T-PC DC-ME-01T-PS Digi **Digi Connect ME 9210** DC-ME-Y401-C DC-ME-Y402-C DC-ME-Y402-LX	■ No JTAG interface ■ Ordered independently for use in your implementation	

Note: DC-ME-01T-CLI (2/8 CLI version - has the CLI enabled by default on the serial port)
DC-ME4-01T-CLI (4/8 CLI version - has the CLI enabled by default on the serial port)
DC-ME-01T-PC (2/8 802.3af compliant -C module)
DC-ME-01T-PS (2/8 802.3af compliant -S module)
DC-ME-Y402-LX (Digi Connect ME 9210 4/8 Linux - production)
DC-ME-Y402-LX-JT (Digi Connect ME 9210 4/8 Linux JTAG - dev only)

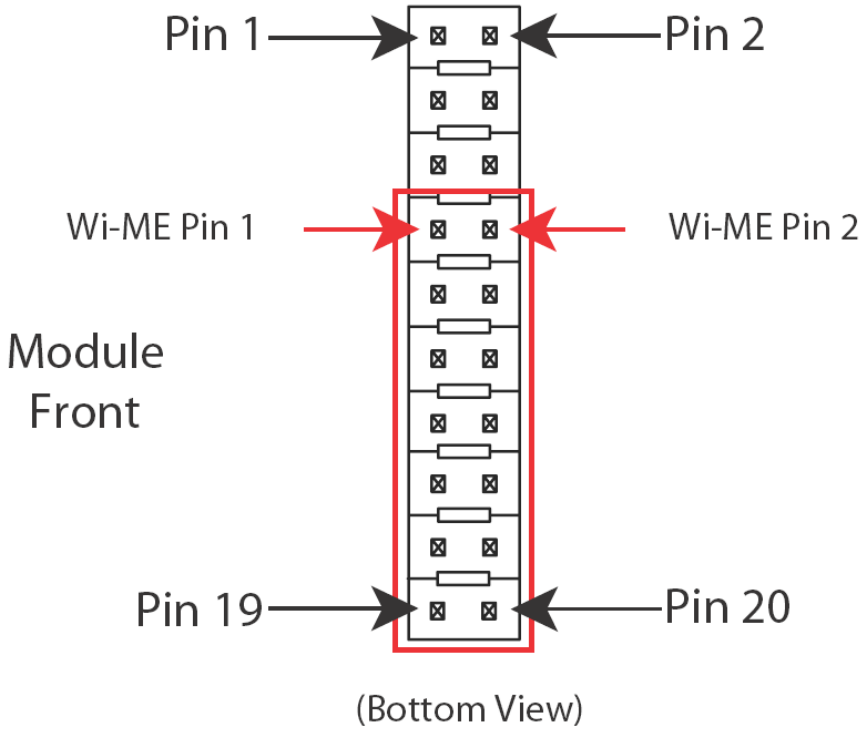
The module has a 20-pin male connector that supports a serial interface with data rates up to 230,400 (Digi Connect ME and Digi Connect Wi-ME)/ 921,600 bps (Digi Connect ME 9210) and full-modem control, and GPIO ports. See the following figure for pin orientation and the table for pin assignments.

Difference in pin assignments/availability

Pin assignments/availability for pins 1 and 2 depend on which module you are using. Pins 1 through 6 are available for Digi Connect ME; these pins are removed for Digi Connect Wi-ME. The pin assignment table shows the appropriate values.

Power and Device Interface Connector

Viewed from bottom of the module:

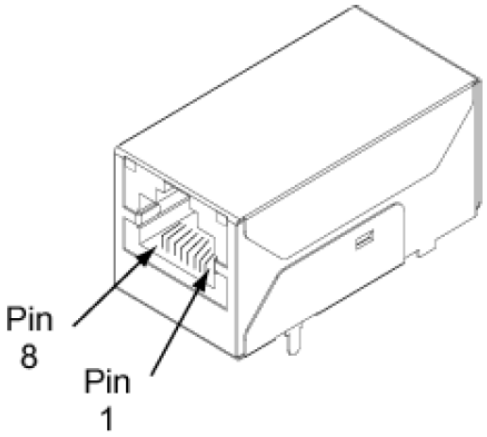


Power and Device Interface Connector Pin Assignments				
Signal				Description
ME		Wi-ME		
Pin #	Function	Pin #	Function	
1	VETH+		—	ME: Power Pass-Thru+ Wi-ME: Position Removed
2	VETH-		—	ME: Power Pass-Thru- Wi-ME: Position removed
3-6	—		—	Position removed
7	RXD	1	RXD	Receive Data (Input)
8	TXD	2	TXD	Transmit Data (Output)
9	RTS	3	RTS	Request to Send (Output)
10	DTR	4	DTR	Data Terminal Ready (Output)
11	CTS	5	CTS	Clear to Send (Input)
12	DSR	6	DSR	Data Set Ready (Input)
13	DCD	7	DCD	Data Carrier Detect (Input)
14	/RESET	8	/RESET	Reset
15	+3.3V	9	+3.3V	Power
16	GND	10	GND	Ground
17, 18		11, 12	—	Not accessible with Digi Plug-and-Play Firmware. If using a development kit, see "Module Pinout" on page 36 for detailed IO configuration information.
19	—	13	—	Reserved. Do not connect.
20	/INIT	14	/INIT	Software Reset

The Ethernet connector is an 8-wire RJ-45 jack that meets the ISO 8877 requirements for 10/100BASE-T. See the following figure and table for pin orientation and pin assignments.

Note: Pin orientation and assignments are the same for modules with or without a JTAG connector.

Ethernet Interface Pin Orientation

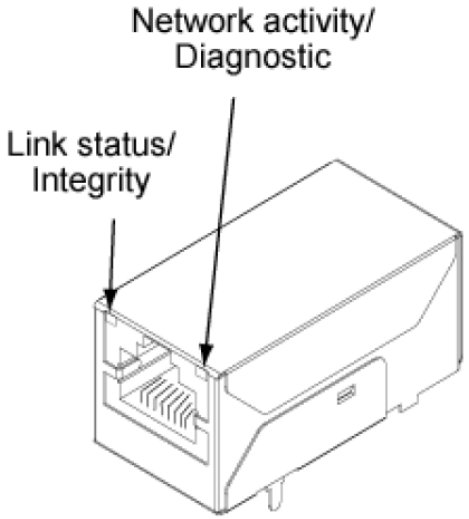


Ethernet Interface Pin Assignments							
Pin 1	**Pin 2**	**Pin 3**	**Pin 4**	**Pin 5**	**Pin 6**	**Pin 7**	**Pin 8**
TXD+	TXD-	RXD+	EPWR+	EPWR+	RXD-	EPWR-	EPWR-
Transmit Data +	Transmit Data -	Receive Data +	Power from Switch +	Power from Switch +	Receive Data -	Power from Switch -	Power from Switch -

The module has two LEDs that are located near the upper corners of the Ethernet port (see the following figure). The following table describes the LEDs.

Note: The LEDs are the same for a module with or without a JTAG connector.

LED Locations



LED Behaviors			
LED	**Digi Plug and Play Firmware Digi Connect ME**	**Digi Plug and Play Firmware Digi Connect Wi-ME**	**Customizable Modules**
Top left (yellow)	Network link status: Off - no link has been detected. On - a link has been detected.	Network link status: On - unit is associated with an access point. Blinking slowly - unit is in ad hoc mode. Blinking quickly - unit is scanning for a network.	Same as Digi Plug-and Play Firmware (Network link status).
Top right (green)	Network activity: Blinking -network data is transmitted or received.		This LED is software programmable.