

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Estrategias de modelado y control de un
horno solar



Curso 2020/2021

Alumno/a:

Francisco Martínez Castro

Director/es:

Manuel Berenguel Soria
Juan Diego Gil Vergel

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Estrategias de modelado y control de un horno solar

Autor: Francisco Martínez Castro

Directores: Manuel Berenguel Soria, Juan Diego Gil Vergel

Almería, Julio 2021

Agradecimientos

A Manuel Berenguel y a Juan Diego Gil por su enorme dedicación, paciencia y ayuda a la hora de tutelar y guiarme durante el desarrollo de este trabajo.

Quiero agradecer también a la Plataforma Solar de Almería (en especial a Lidia Roca, José Rodríguez, Inmaculada García y Diego Martínez) por haber podido utilizar datos de ensayos realizados en el marco de los proyectos "Enhancement and Development of Industrial Applications of Solar Energy Technologies" - Human Capital and Mobility - Large Installations Program, el Acuerdo Específico de Colaboración entre la Plataforma Solar y el Grupo TEP197 "Desarrollo de Sistemas de Control para Plantas Termosolares" y Sfera II.

Índice general

Agradecimientos	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XXI
Lista de acrónimos	XXV
Lista de símbolos, parámetros y variables	XXVII
Resumen	XXIX
Abstract	XXXI
1 Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Contexto y revisión bibliográfica	1
1.3 Objetivo del trabajo	2
1.4 Resumen de resultados.....	3
1.4.1 Calibración y validación del modelo no lineal.....	3
1.4.2 Validación del modelo linealizado	3
1.4.3 Resultados de control.....	5
1.5 Fases de desarrollo y planificación temporal	9
1.5.1 Fases de desarrollo del trabajo	9
1.5.2 Planificación temporal del trabajo.....	9
1.6 Estructura de la memoria	11
2 Materiales y métodos	13
2.1 Descripción del horno solar de la PSA	13
2.2 Ecuaciones físicas que modelan la dinámica del horno solar e implementación del modelo no lineal.	14
2.2.1 Descripción de la ecuación del modelo	14
2.2.2 Implementación en MATLAB del modelo no lineal.....	17
2.3 Calibración del modelo no lineal: Algoritmo genético.....	20
2.4 Índices de funcionamiento.	24
2.5 Linealización y obtención del modelo lineal.....	25
2.6 Diseño de controladores básicos tipo PID	31
2.6.1 Control ante escalón en la referencia.....	31
2.6.2 Control ante rampa en la referencia.....	33
2.7 Tratamiento de las restricciones con el método <i>antiwindup</i>	35
2.8 Control anticipativo	36

3	Resultados y discusión	41
3.1	Calibración y validación del modelo no lineal	41
3.1.1	Acero A316-L.....	41
3.1.2	Zirconia blanca	52
3.1.3	Sinterizado de cobre.....	65
3.1.4	Carburo de silicio.....	78
3.1.5	Resumen de calibración: valores finales de los parámetros estimados. ...	88
3.2	Validación del modelo lineal.....	88
3.2.1	Acero A316L.....	89
3.2.2	Zirconia blanca	135
3.2.3	Sinterizado de cobre.....	165
3.2.4	Carburo de silicio.....	195
3.2.5	Comparación de modelos de las distintas muestras.....	230
3.3	Resultados de diseño de control anticipativo	232
3.4	Resultados de control.....	236
3.4.1	PI + <i>antiwindup</i> + control por adelanto.....	236
3.4.2	Doble PI + <i>antiwindup</i> + control por adelanto.....	249
3.4.3	Conmutación de controladores rampa-escalón.....	256
4	Conclusiones y líneas futuras	263
	Bibliografía.....	265

Índice de figuras

Figura 1.1. Esquema general final del controlador PI + antiwindup + controlador anticipativo.	5
Figura 1.2. Ejemplo del resultado para la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	6
Figura 1.3. Ejemplo del resultado para la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	7
Figura 1.4. Ejemplo del resultado para la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Error entre la referencia y la salida.....	7
Figura 1.5. Ejemplo del resultado para la muestra de cobre. Combinación de controlador para rampa y controlador para escalón, con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.	8
Figura 1.6. Ejemplo del resultado para la muestra de cobre. Combinación de controlador para rampa y controlador para escalón, con antiwindup y control anticipativo. Error entre salida y referencia.....	8
Figura 1.7. Resumen de horas dedicadas al trabajo fin de máster por parte del alumno.	10
Figura 2.1. Esquema simplificado del sistema [3].....	14
Figura 2.2. Diagrama de bloques de SIMULINK de la vista general del modelo.....	18
Figura 2.3. No linealidades en la señal de apertura de la persiana, que se implementan previamente a la ecuación (2.10) del modelo.	18
Figura 2.4. Vista en detalle de la implementación del modelo no lineal en SIMULINK.	18
Figura 2.5. Esquema de un sistema en bucle cerrado.	32
Figura 2.6. Lugar de las raíces típico de un sistema de segundo orden.	34
Figura 2.7. Esquema general antiwindup (considerando solo como controlador una acción integral).	35
Figura 2.8. Esquema de un sistema en bucle cerrado teniendo en cuenta la radiación. .	37
Figura 2.9. Esquema de un sistema en bucle cerrado teniendo en cuenta la radiación y el controlador anticipativo.....	38
Figura 3.1. Calibración muestra de acero A316-L con el ensayo del día 24/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.	43
Figura 3.2. Calibración muestra de acero A316-L con el ensayo del día 24/02/1997. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	44
Figura 3.3. Calibración completa de la muestra de acero A316-L, ensayo del día 25/02/1997. Temperatura simulada, temperatura real y radiación solar.....	45
Figura 3.4. Calibración completa muestra de acero A316-L, ensayo del día 25/02/1997. Apertura persiana y temperatura ambiente.....	45
Figura 3.5. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 21/02/1997, parte I. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.	47
Figura 3.6. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 21/02/1997, parte I. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	47
Figura 3.7. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 21/02/1997, parte II. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.	48
Figura 3.8. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 21/02/1997, parte II. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	48

Figura 3.9. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 06/03/1997, parte I. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.	49
Figura 3.10. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 06/03/1997, parte I. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	50
Figura 3.11. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 06/03/1997, parte II. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.	51
Figura 3.12. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 06/03/1997, parte II. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	51
Figura 3.13. Calibración del modelo no lineal, muestra de zirconia blanca, 26/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.	55
Figura 3.14. Calibración del modelo no lineal, muestra de zirconia blanca, del 26/02/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	55
Figura 3.15. Calibración del modelo no lineal, muestra de zirconia blanca, del 27/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.	56
Figura 3.16. Calibración del modelo no lineal, muestra de zirconia blanca, 27/02/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	57
Figura 3.17. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 26/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.	58
Figura 3.18. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 26/02/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	59
Figura 3.19. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 27/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.	60
Figura 3.20. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 27/02/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	60
Figura 3.21. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 03/03/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.	61
Figura 3.22 Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 03/03/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	62
Figura 3.23. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 04/03/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.	63
Figura 3.24. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 04/03/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	63
Figura 3.25. Disposición de la muestra de cobre con los termopares dentro de la caja metálica. Imagen cortesía de la PSA.	65
Figura 3.26. Cámara de vacío presente en el horno solar en cuyo centro se visualiza la muestra de cobre a través de una abertura cuadrada de 80 mm de lado. Imagen cortesía de la PSA.	66
Figura 3.27. Interior de la cámara de vacío, en cuya base se muestra la abertura por donde recibe la radiación la muestra de cobre. Imagen cortesía de la PSA.	66
Figura 3.28. Esquema de la disposición de ciertos experimentos donde la muestra recibe de forma horizontal la radiación dentro de la cámara de vacío gracias a un espejo de redireccionamiento. Figura cortesía de la PSA.	67
Figura 3.29. Esquema de la disposición de ciertos experimentos donde la muestra recibe de forma horizontal la radiación dentro de la cámara de vacío gracias a un espejo de redireccionamiento, en detalle. Figura cortesía de la PSA.	67
Figura 3.30. Disposición de la caja con los cables de cobre y los termopares en los ensayos. Figura cortesía de la PSA.	69

Figura 3.31. Calibración del modelo no lineal, muestra de cobre, 08/05/2012. Temperatura de la muestra y radiación solar.....	71
Figura 3.32. Calibración del modelo no lineal, muestra de cobre, 08/05/2012. Apertura de persiana y temperatura ambiente.....	71
Figura 3.33. Calibración del modelo no lineal, muestra de cobre, 09/05/2012. Temperatura de la muestra y radiación solar.....	72
Figura 3.34. Calibración del modelo no lineal, muestra de cobre, 09/05/2012. Apertura de persiana y temperatura ambiente.....	73
Figura 3.35. Validación muestra de cobre, ensayo del día 10/05/2012. Temperatura de la muestra y radiación solar.....	75
Figura 3.36 Validación muestra de cobre, ensayo del día 10/05/2012. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	75
Figura 3.37. Validación muestra de cobre, ensayo del día 11/05/2012. Temperatura de la muestra y radiación solar.....	76
Figura 3.38. Validación muestra de cobre, ensayo del día 11/05/2012. Apertura de persiana y temperatura ambiente.	77
Figura 3.39. Calibración del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 30/07/1996. Temperatura de la muestra y radiación solar.	80
Figura 3.40. Calibración del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 30/07/1996. Apertura de la persiana y radiación solar.....	81
Figura 3.41. Calibración del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 07/07/1996. Temperatura de la muestra y radiación solar.	82
Figura 3.42. Calibración del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 07/07/1998. Apertura de la persiana y radiación solar.....	82
Figura 3.43. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 30/07/1996. Temperatura de la muestra y radiación solar.....	84
Figura 3.44. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 30/07/1998. Apertura de la persiana y radiación solar.	84
Figura 3.45. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 07/07/1996. Temperatura de la muestra y radiación solar.....	85
Figura 3.46. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 07/07/1998. Temperatura de la muestra y radiación solar.....	85
Figura 3.47. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 22/07/1998. Apertura de la persiana y radiación solar.	86
Figura 3.48. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 22/07/1998. Apertura de la persiana y radiación solar.	87
Figura 3.49. Gráfica en 3 dimensiones de la T^a de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de acero A316-L.....	90
Figura 3.50. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo (τ) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de acero A316-L.....	92
Figura 3.51. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia kU del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de acero A316-L.....	93
Figura 3.52. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos.....	94

Figura 3.53. Zoom realizado a la gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos, con los dos planos extras añadidos para obtener más precisión en la división del rango de operación.....	95
Figura 3.54. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos.	96
Figura 3.55. Zoom realizado a la gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos, con el plano extra añadido para obtener más precisión en la división del rango de operación.	97
Figura 3.56. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº1, muestra de acero A316-L.	100
Figura 3.57. Validación modelo lineal nº1 de la muestra de acero A316-L, radiación 900 W/m^2	101
Figura 3.58. Error de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de acero A316-L, radiación 900 W/m^2	101
Figura 3.59. Validación modelo lineal nº1 de la muestra de acero A316-L, radiación 1000 W/m^2	102
Figura 3.60. Error de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de acero A316-L, radiación 1000 W/m^2	103
Figura 3.61. Validación modelo lineal nº2 (caso A) de la muestra de acero A316-L, radiación 600 W/m^2	105
Figura 3.62. Error de validación, modelo lineal nº2 (caso A) de la muestra de acero A316-L, radiación 600 W/m^2	105
Figura 3.63. Validación modelo lineal nº2 (caso A) de la muestra de acero A316-L, radiación 700 W/m^2	106
Figura 3.64. Error de validación, modelo lineal nº2 (caso A) de la muestra de acero A316-L, radiación 700 W/m^2	107
Figura 3.65. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº2, muestra de acero A316-L.	109
Figura 3.66. Validación modelo lineal nº2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m^2	110
Figura 3.67. Error absoluto de validación, modelo lineal nº2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m^2	110
Figura 3.68. Validación modelo lineal nº2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m^2	111
Figura 3.69. Error absoluto de validación, modelo lineal nº2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m^2	112
Figura 3.70. Validación modelo lineal nº2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m^2	113
Figura 3.71. Error absoluto de validación, modelo lineal nº2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m^2	113
Figura 3.72. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº3, muestra de acero A316-L.	115
Figura 3.73. Validación modelo lineal nº3 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m^2	116

Figura 3.74. Error absoluto de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m ² .	116
Figura 3.75. Validación modelo lineal nº3 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m ² .	117
Figura 3.76. Error absoluto de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m ² .	117
Figura 3.77. Validación modelo lineal nº3 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m ² .	118
Figura 3.78. Error absoluto de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m ² .	119
Figura 3.79. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº4, muestra de acero A316-L.	120
Figura 3.80. Validación modelo lineal nº4 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m ² .	121
Figura 3.81. Error absoluto de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m ² .	121
Figura 3.82. Validación modelo lineal nº4 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m ² .	122
Figura 3.83. Error absoluto de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m ² .	122
Figura 3.84. Validación modelo lineal nº4 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m ² .	123
Figura 3.85. Error absoluto de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m ² .	123
Figura 3.86. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº5, muestra de acero A316-L.	125
Figura 3.87. Validación modelo lineal nº5 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m ² .	126
Figura 3.88. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m ² .	126
Figura 3.89. Validación modelo lineal nº5 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m ² .	127
Figura 3.90. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m ² .	127
Figura 3.91. Validación modelo lineal nº5 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m ² .	128
Figura 3.92. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m ² .	128
Figura 3.93. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº6, muestra de acero A316-L.	130
Figura 3.94. Validación modelo lineal nº6 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m ² .	131
Figura 3.95. Error absoluto de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m ² .	131
Figura 3.96. Validación modelo lineal nº6 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m ² .	132

Figura 3.97. Error absoluto de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m ² .	132
Figura 3.98. Validación modelo lineal nº6 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m ² .	133
Figura 3.99. Error absoluto de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m ² .	134
Figura 3.100. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia (<i>k</i>) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de zirconia blanca.	137
Figura 3.101. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo (τ) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de acero zirconia blanca.	137
Figura 3.102. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m ²), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de zirconia blanca.	138
Figura 3.103. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m ²), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de zirconia blanca.	139
Figura 3.104. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº1 y 2, muestra de zirconia blanca.	141
Figura 3.105. Validación, modelo lineal nº1 de la muestra de zirconia blanca, radiación 900 W/m ² .	141
Figura 3.106. Error absoluto de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de zirconia blanca, radiación 900 W/m ² .	142
Figura 3.107. Validación, modelo lineal nº1 de la muestra de zirconia blanca, radiación 1000 W/m ² .	143
Figura 3.108. Error absoluto de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de zirconia blanca, radiación 1000 W/m ² .	143
Figura 3.109. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de zirconia blanca, radiación 600 W/m ² .	145
Figura 3.110. Error absoluto de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de zirconia blanca, radiación 600 W/m ² .	145
Figura 3.111. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de zirconia blanca, radiación 700 W/m ² .	146
Figura 3.112. Error absoluto de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de zirconia blanca, radiación 700 W/m ² .	147
Figura 3.113. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº3, muestra de zirconia blanca.	148
Figura 3.114. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m ² .	149
Figura 3.115. Error absoluto de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m ² .	149
Figura 3.116. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m ² .	150
Figura 3.117. Error absoluto de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m ² .	150

Figura 3.118. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m ²	151
Figura 3.119. Error absoluto de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m ²	151
Figura 3.120. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº4, muestra de zirconia blanca.	152
Figura 3.121. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m ²	153
Figura 3.122. Error absoluto de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m ²	153
Figura 3.123. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m ²	154
Figura 3.124. Error absoluto de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m ²	154
Figura 3.125. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m ²	155
Figura 3.126. Error de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m ²	155
Figura 3.127. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº5, muestra de zirconia blanca.	157
Figura 3.128. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m ²	157
Figura 3.129. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m ²	158
Figura 3.130. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m ²	158
Figura 3.131. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m ²	159
Figura 3.132. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m ²	159
Figura 3.133. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m ²	160
Figura 3.134. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº5, muestra de zirconia blanca.	161
Figura 3.135. Validación, modelo lineal nº6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m ²	162
Figura 3.136. Error absoluto de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m ²	162
Figura 3.137. Validación, modelo lineal nº6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m ²	163
Figura 3.138. Error absoluto de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m ²	163
Figura 3.139. Validación, modelo lineal nº6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m ²	164
Figura 3.140. Error absoluto de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m ²	164

Figura 3.141. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia (k) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de cobre.....	167
Figura 3.142. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo (τ) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de cobre.....	167
Figura 3.143. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de cobre	168
Figura 3.144. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de cobre.	170
Figura 3.145. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº1 y 2A, muestra de cobre.	172
Figura 3.146. Validación, modelo lineal nº1 de la muestra de cobre, radiación $900 W/m^2$	172
Figura 3.147. Error absoluto de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de cobre, radiación $900 W/m^2$	173
Figura 3.148. Validación, modelo lineal nº1 de la muestra de cobre, radiación $900 W/m^2$	173
Figura 3.149. Error absoluto de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de cobre, radiación $1000 W/m^2$	174
Figura 3.150. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $900 W/m^2$	175
Figura 3.151. Error absoluto de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $600 W/m^2$	176
Figura 3.152. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $700 W/m^2$	176
Figura 3.153. Error absoluto de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $700 W/m^2$	177
Figura 3.154. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº2B, muestra de cobre.	178
Figura 3.155. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $650 W/m^2$	179
Figura 3.156. Error de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $650 W/m^2$	179
Figura 3.157. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $800 W/m^2$	180
Figura 3.158. Error de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $800 W/m^2$	180
Figura 3.159. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $950 W/m^2$	181
Figura 3.160. Error de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de cobre, radiación $950 W/m^2$	181
Figura 3.161. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº3, muestra de cobre.....	183

Figura 3.162. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	183
Figura 3.163 Error de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	184
Figura 3.164. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	184
Figura 3.165. Error de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	185
Figura 3.166. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	185
Figura 3.167. Error de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m ²	186
Figura 3.168. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº3, muestra de cobre.	187
Figura 3.169. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	188
Figura 3.170. Error de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	188
Figura 3.171. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m ²	189
Figura 3.172. Error de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m ²	189
Figura 3.173. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m ²	190
Figura 3.174. Error de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m ²	190
Figura 3.175. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº5, muestra de cobre.	191
Figura 3.176. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	192
Figura 3.177. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m ²	192
Figura 3.178. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m ²	193
Figura 3.179. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m ²	193
Figura 3.180. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m ²	194
Figura 3.181. Error absoluto de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m ²	194
Figura 3.182. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m ²). Muestra de carburo de silicio	196
Figura 3.183. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m ²) Muestra de carburo de silicio	197

Figura 3.184. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de carburo de silicio. ...	198
Figura 3.185. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de carburo de silicio	199
Figura 3.186. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº1 y 2A, muestra de carburo de silicio.	201
Figura 3.187. Validación, modelo lineal nº1 de la muestra de carburo de silicio, radiación $900 W/m^2$	201
Figura 3.188. Error de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de carburo de silicio, radiación $900 W/m^2$	202
Figura 3.189. Validación, modelo lineal nº1 de la muestra de carburo de silicio, radiación $1000 W/m^2$	202
Figura 3.190. Error de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de carburo de silicio, radiación $1000 W/m^2$	203
Figura 3.191. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $600 W/m^2$	204
Figura 3.192. Error de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $600 W/m^2$	205
Figura 3.193. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $700 W/m^2$	205
Figura 3.194. Error de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $700 W/m^2$	206
Figura 3.195. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº2B, muestra de carburo de silicio.	207
Figura 3.196. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $650 W/m^2$	208
Figura 3.197. Error de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $650 W/m^2$	208
Figura 3.198. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $800 W/m^2$	209
Figura 3.199. Error de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $800 W/m^2$	209
Figura 3.200. Validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $950 W/m^2$	210
Figura 3.201. Error de validación, modelo lineal nº2 de la muestra de carburo de silicio, radiación $950 W/m^2$	210
Figura 3.202. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº3, muestra de carburo de silicio.	211
Figura 3.203. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de carburo de silicio, radiación $650 W/m^2$	212
Figura 3.204. Error de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de carburo de silicio, radiación $950 W/m^2$	213
Figura 3.205. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de carburo de silicio, radiación $800 W/m^2$	213

Figura 3.206. Error de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m ² .	214
Figura 3.207. Validación, modelo lineal nº3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m ² .	215
Figura 3.208. Error de validación, modelo lineal nº3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m ² .	215
Figura 3.209. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº4, muestra de carburo de silicio.	216
Figura 3.210. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m ² .	217
Figura 3.211. Error de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m ² .	217
Figura 3.212. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m ² .	218
Figura 3.213. Error de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m ² .	218
Figura 3.214. Validación, modelo lineal nº4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m ² .	219
Figura 3.215. Error de validación, modelo lineal nº4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m ² .	219
Figura 3.216. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº5, muestra de carburo de silicio.	221
Figura 3.217. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m ² .	222
Figura 3.218. Error de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m ² .	222
Figura 3.219. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m ² .	223
Figura 3.220. Error de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m ² .	223
Figura 3.221. Validación, modelo lineal nº5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m ² .	224
Figura 3.222. Error de validación, modelo lineal nº5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m ² .	224
Figura 3.223. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº6, muestra de carburo de silicio.	226
Figura 3.224. Validación, modelo lineal nº6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m ² .	227
Figura 3.225. Error de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m ² .	227
Figura 3.226. Validación, modelo lineal nº6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m ² .	228
Figura 3.227. Error de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m ² .	228
Figura 3.228. Error de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m ² .	229

Figura 3.229. Error de validación, modelo lineal nº6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m ²	229
Figura 3.230. Ganancia de los modelos lineales de las distintas muestras.	231
Figura 3.231. Constante de tiempo de los modelos lineales.	231
Figura 3.232. Gráfica de la variación de la ganancia kI del modelo lineal de la radiación frente a la apertura de la persiana y la radiación solar. Muestra de acero A316-L.	233
Figura 3.233. Gráfica de la variación de la ganancia kI del modelo lineal de la radiación frente a la apertura de la persiana y la radiación solar. Muestra de zirconia blanca.....	233
Figura 3.234. Gráfica de la variación de la ganancia kI del modelo lineal de la radiación frente a la apertura de la persiana y la radiación solar. Muestra de cobre.	234
Figura 3.235. Gráfica de la variación de la ganancia kI del modelo lineal de la radiación frente a la apertura de la persiana y la radiación solar. Muestra de carburo de silicio.	235
Figura 3.236. Esquema final del controlador PI + antiwindup + controlador anticipativo.	237
Figura 3.237. Esquema del banco de controladores (en azul cian) implementado, con entrada a cada controlador de la señal de error y de la apertura de persiana tras las no linealidades previas a la planta. En naranja, la función que selecciona el controlador en función del rango de operación	237
Figura 3.238. Esquema del controlador PI con la técnica antiwindup, y con las condiciones iniciales.	238
Figura 3.239. Ensayo de controlador PI + antiwindup + control anticipativo para estudiar el efecto del control anticipativo, gráfica de la salida. Muestra de acero.	238
Figura 3.240. Ensayo de controlador PI + antiwindup + control anticipativo para estudiar el efecto del control anticipativo, gráfica de la apertura de la persiana (%). Muestra de acero.	239
Figura 3.241. Ensayo de controlador PI + antiwindup + control anticipativo para estudiar el efecto del control anticipativo (%). Muestra de acero.	239
Figura 3.242. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	240
Figura 3.243. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana real y temperatura ambiente.....	241
Figura 3.244. Ensayo (2) con la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	242
Figura 3.245. Ensayo (2) con la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana real y temperatura ambiente.....	242
Figura 3.246. Ensayo (1) con la muestra de zirconia blanca. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	243
Figura 3.247. Ensayo (1) con la muestra de zirconia blanca. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	244
Figura 3.248. Zoom del ensayo (1) con la muestra de zirconia blanca. PI con antiwindup y control anticipativo. Error ante rampa, salida y referencia.	244
Figura 3.249. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	245
Figura 3.250. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	246

Figura 3.251. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Zoom de la apertura de la persiana y temperatura ambiente, en torno a los 250 segundos.	246
Figura 3.252. Ensayo (2) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	247
Figura 3.253. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	247
Figura 3.254. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana (sin antiwindup) y temperatura ambiente.	248
Figura 3.255. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	249
Figura 3.256. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	249
Figura 3.257. Estructura interna de uno de los controladores ante referencias en rampa.	250
Figura 3.258. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	251
Figura 3.259. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	251
Figura 3.260. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	252
Figura 3.261. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Número del controlador activo.	252
Figura 3.262. Ensayo (2) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	253
Figura 3.263. Ensayo (2) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	254
Figura 3.264. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	255
Figura 3.265. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	255
Figura 3.266. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.....	257
Figura 3.267. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.	257
Figura 3.268. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Error entre referencia y temperatura.	258
Figura 3.269. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Número de controlador ante rampa que está activo en función del rango de operación en el que se trabaja. No se incluye el cambio de control ante rampa a control ante escalón y viceversa, que se dan a los 2000 y 3250 segundos.	258
Figura 3.270. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.	259
Figura 3.271. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.....	260

Figura 3.272. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.....	260
Figura 3.273. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. Número de controlador ante rampa que está activo en función del rango de operación en el que se trabaja. No se incluye el cambio de control ante rampa a control ante escalón y viceversa, que se dan a los 2750 y 4250 segundos.	261

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de los valores obtenidos de las distintas calibraciones para las distintas muestras, ya calibrados.....	3
Tabla 2. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de acero A316-L.	4
Tabla 3. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de acero zirconia blanca.	4
Tabla 4. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de cobre.	4
Tabla 5. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de carburo de silicio.....	4
Tabla 6. N° de horas dedicadas al trabajo fin de máster por semana por parte del alumno.....	10
Tabla 7. Datos de días de ensayo reales utilizados según la muestra para la calibración y validación del modelo no lineal.....	22
Tabla 8. Dependencia de las distintas variables y parámetros con la muestra de ensayo.	23
Tabla 9. Límites físicos de los parámetros αa , αc y αe que se estiman con el algoritmo genético, que sirven de guía para imponer unos límites iniciales al algoritmo genético.	24
Tabla 10. Parámetros característicos de cada muestra utilizada en los ensayos que se introducen en el modelo.	41
Tabla 11. Dependencia del calor específico con la temperatura para la muestra de acero A316L.	42
Tabla 12. Clasificación de los datos del acero A316-L en calibración o validación.	42
Tabla 13. Parámetros obtenidos durante la calibración para el material de acero A316-L.	46
Tabla 14. Índices de funcionamiento del modelo para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.....	52
Tabla 15. Clasificación de los datos de la muestra de zirconia blanca en calibración o validación.	53
Tabla 16. Dependencia del calor específico con la temperatura para la muestra de zirconia blanca.	54
Tabla 17. Parámetros obtenidos de calibrar el modelo no lineal para los distintos ensayos de la muestra de zirconia blanca.....	58
Tabla 18. Índices de funcionamiento del modelo para la zirconia blanca en el ensayo de validación del 03 de marzo de 1997.	64
Tabla 19. Dependencia del calor específico con la temperatura para la muestra de cobre.	69
Tabla 20. Clasificación de los datos de la muestra de cobre en calibración o validación.	69
Tabla 21. Parámetros obtenidos de calibrar el modelo no lineal para los distintos ensayos de la muestra de cobre.....	74
Tabla 22. Índices de funcionamiento del modelo no lineal para el sinterizado de cobre en los distintos ensayos de validación.....	77

Tabla 23. Dependencia del calor específico con la temperatura para la muestra de carburo de silicio, según [6].	79
Tabla 24. Clasificación de los datos de la muestra de carburo de silicio en calibración o validación.	79
Tabla 25. Parámetros obtenidos de calibrar el modelo no lineal para los distintos ensayos de la muestra de carburo de silicio.	83
Tabla 26. Índices de funcionamiento del modelo no lineal para el carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.	87
Tabla 27. Resumen de los valores obtenidos de las distintas calibraciones para las distintas muestras, ya calibrados.....	88
Tabla 28. Resumen de los parámetros característicos de la muestra de acero A316L que conforman el modelo.	89
Tabla 29. Intervalos del rango de operación para la apertura de la persiana establecidos para la muestra de acero A316-L, y ganancia media de cada intervalo.....	95
Tabla 30. Intervalos del rango de operación establecidos para la muestra de acero A316-L, y constante de tiempo media para cada uno.....	97
Tabla 31. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de acero A316-L.	98
Tabla 32. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal nº1, Acero A316-L.	99
Tabla 33. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº1 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.	103
Tabla 34. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº2 (caso A) respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.....	107
Tabla 35. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal nº2, Acero A316-L.	108
Tabla 36. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº2 (caso B) respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.....	114
Tabla 37. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal nº3, Acero A316-L.	115
Tabla 38. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº3 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.	119
Tabla 39. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal nº3, Acero A316-L.	120
Tabla 40. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº4 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.	124
Tabla 41. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal nº3, Acero A316-L.	125
Tabla 42. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº5 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.	129
Tabla 43. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal nº3, Acero A316-L.	129
Tabla 44. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº6 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.	135
Tabla 45. Resumen de los parámetros característicos de la muestra de zirconia blanca que conforman el modelo.....	135

Tabla 46. Intervalos del rango de operación para la apertura de la persiana establecidos para la muestra de zirconia blanca y ganancia media de cada intervalo.....	139
Tabla 47. Intervalos del rango de operación establecidos para la muestra de zirconia blanca, y constante de tiempo media para cada uno.	140
Tabla 48. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de acero zirconia blanca.	140
Tabla 49. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°1 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.....	144
Tabla 50. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°2 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.....	147
Tabla 51. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°3 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.....	152
Tabla 52. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°4 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.....	156
Tabla 53. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°5 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.....	160
Tabla 54. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°6 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.....	165
Tabla 55. Resumen de los parámetros característicos de la muestra de cobre que conforman el modelo.	165
Tabla 56. Intervalos del rango de operación para la apertura de la persiana establecidos para la muestra de cobre, y ganancia media de cada intervalo.....	169
Tabla 57. Intervalos del rango de operación establecidos para la muestra de cobre, y constante de tiempo media para cada uno.	170
Tabla 58. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de cobre.	171
Tabla 59. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°1 respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.....	174
Tabla 60. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°2A respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.....	177
Tabla 61. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°2B respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.....	182
Tabla 62. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°3 respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.....	186
Tabla 63. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°4 respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.....	191
Tabla 64. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°5 respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.....	195
Tabla 65. Resumen de los parámetros característicos de la muestra de carburo de silicio que conforman el modelo.	195
Tabla 66. Intervalos del rango de operación para la apertura de la persiana establecidos para la muestra de carburo de silicio y ganancia media de cada intervalo.	198
Tabla 67. Intervalos del rango de operación establecidos para la muestra de carburo de silicio, y constante de tiempo media para cada uno.....	199
Tabla 68. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de carburo de silicio.....	200

Tabla 69. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº1 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación. ...	203
Tabla 70. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº2A respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación. ...	206
Tabla 71. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº2B respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación. ...	211
Tabla 72. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº3 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación. ...	216
Tabla 73. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº4 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación. ...	220
Tabla 74. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº5 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación. ...	225
Tabla 75. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº6 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación. ...	230

Lista de acrónimos

Abreviatura	Significado original	Significado en castellano
FF	<i>Feedforward</i>	Control por adelantado
PID	<i>Proportional, Integral and Derivative</i>	Proporcional, Integral y Derivativo
PSA	Plataforma Solar de Almería	Plataforma Solar de Almería
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>	Raíz del error cuadrático medio
TFM	Trabajo de Fin de Máster	Trabajo de Fin de Máster

Lista de símbolos, parámetros y variables

Lista de símbolos y variables	Descripción	Unidades
A	Área de apertura de la persiana	m^2
α_a	Absortividad solar del material (de 0 a 1)	-
α_c	Coefficiente de transmisión de calor por convección	$W/(m^2 \cdot K)$
α_e	Emisividad del material (de 0 a 1)	-
α_0	Ángulo de la persiana totalmente cerrada, 55°	$^\circ$, rad
c_s	Calor específico de la muestra	$J/(kg \cdot K)$
$C(s)$	Controlador por realimentación en tiempo continuo	
E_{max}	Error máximo	$^\circ C$
E_{med}	Error medio absoluto	$^\circ C$
E	Energía térmica	J
$E(s)$	Error entre salida y referencia	$^\circ C$
$FF(s)$	Controlador por adelanto en tiempo continuo	$\%/(W \cdot m^2)$
$G(s)$	Función de transferencia del sistema en tiempo continuo	$^\circ C/\%$
$G_D(s)$	Función de transferencia de la perturbación en tiempo continuo	$^\circ C/(W \cdot m^2)$
I	Irradiancia directa	W/m^2
k_I	Ganancia del modelo lineal respecto de la radiación	$^\circ C/(W \cdot m^2)$
k_{T_a}	Ganancia del modelo lineal respecto de la temperatura ambiente	$^\circ C/^\circ C$
k_U	Ganancia modelo lineal respecto de la entrada	$(^\circ C/\%)$
m_s	Masa de la muestra	kg
P_i	Potencia de entrada	W
P_c	Potencia de pérdidas por convección	W
P_r	Potencia de pérdidas por radiación	W
ρ_c	Reflectividad del concentrador	-

ρ_h	Reflectividad del heliostato	-
R^2	Coficiente de determinación	-
$R(s)$	Referencia de temperatura en tiempo continuo	°C
$RMSE$	Raíz del error cuadrático medio	°C
t	Tiempo	s
T	Temperatura de la muestra	°C
T_a	Temperatura ambiente del ensayo	°C
τ	Constante de tiempo del modelo lineal	s
$SS_{residual}$	Error real al cuadrado	(°C) ²
SS_{total}	Varianza real	(°C) ²
$S_f(90\%)$	Área de concentración de la radiación en la muestra	m ²
S_s	Superficie de la muestra	m ²
σ	$5.67 \cdot 10^{-8}$	W/(m ² ·K ⁴)
U	Apertura de la persiana	%
$U(s)$	Entrada al modelo en tiempo continuo	%
$U_C(s)$	Salida del controlador por realimentación en tiempo continuo	%
$U_{FF}(s)$	Salida del controlador por adelanto en tiempo continuo	%
$Y(s)$	Salida del modelo en tiempo continuo	°C
$Y_D(s)$	Salida del modelo de la perturbación en tiempo continuo	°C
\bar{Y}	Valor medio de la salida en un ensayo	°C
Y_{real}	Salida real del horno	°C
Y_{sim}	Salida del modelo	°C

Resumen

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo el modelado y control de un horno solar, una instalación en la que se ensaya el comportamiento de distintos tipos de materiales cuando se someten a perfiles de altas temperaturas con el objetivo de analizar distintas características. Para ello se hace uso de un modelo no lineal basado en el intercambio de calor de la muestra, y que presenta ciertos parámetros que son desconocidos y que es necesario estimar para tener un modelo válido. Es por eso que, en el presente trabajo, se aplica un algoritmo genético capaz de buscar una estimación de dichos parámetros que mejor se ajustan a la dinámica deseada, y para lo que se utilizan cuatro tipos de muestras distintas de las que se poseen registros de datos de medidas de temperatura de la muestra, radiación solar, temperatura ambiente y apertura de la persiana, las cuatro entradas y salidas del horno que se utilizan para calibrar el modelo y validarlo.

Una de las peculiaridades que presenta este trabajo es la alta no linealidad que rige este proceso, que es muy pronunciada cuando se trabaja a bajos porcentajes de apertura de la persiana, la variable manipulable que regula la radiación entrante al horno. Debido a ello se estudian en el presente trabajo las dinámicas de los distintos tipos de piezas, dinámicas basadas en un modelo no lineal previamente calibrado con un algoritmo genético y validado, y para las cuales se obtienen modelos de primer orden en base a la propia linealización del modelo principal, que se evalúan con índices de funcionamiento. Además, se estudiarán diversas estructuras de control que permitan conseguir error nulo en régimen permanente frente a referencias en forma de rampa y referencias en forma de escalón, pues son perfiles habituales en los que se trabaja en este tipo de instalación.

Abstract

This Final Master Project aims to model and control a solar furnace, an installation in which different types of pieces are heated to high temperatures in order to analyze their physical characteristics. To achieve this, a non-linear model is used based on the heat exchange of the sample which presents certain parameters that are unknown and that it is necessary to estimate in order to have a valid model of the process. That is why, in the present work, a genetic algorithm is applied capable of finding an estimate of the values of these unknown parameters that best fit the desired dynamics, and for which four different types of samples are used, of which there are records of data measured for sample temperature, solar radiation, ambient temperature and shutter opening, the four main inputs and outputs needed to calibrate and validate the model.

One of the great peculiarities that this work presents is the high non-linearity that governs this process, which is very pronounced when working at low shutter opening percentages, the manipulable variable that regulates the radiation entering the furnace. Due to this fact, the dynamics of the different types of pieces are studied in the present work, dynamics based on a non-linear model previously calibrated and validated with a genetic algorithm, and for which first-order models are obtained based on the linearization of the main model, which are evaluated with performance indices. In addition, various control structures will be studied that allow zero error to be achieved in steady state compared to ramp-shaped references and step-shaped references, as these are the typical temperature profiles used in this facility.

1 Introducción

1.1 Motivación

Hoy en día existe la necesidad de optimizar y aprovechar al máximo las fuentes de energía limpias y renovables que la sociedad tiene a su alcance, y entre las fuentes disponibles, destaca la energía solar debido a las distintas formas que existen de aprovecharla o aplicarla. Por ejemplo, para la generación de energía, la energía solar puede aprovecharse utilizando el calor que produce o también puede aprovecharse la energía de los fotones de la luz que alcanza la superficie terrestre para mover cargas eléctricas.

Sin embargo, no todas las aplicaciones de la energía solar están enfocadas a la generación eléctrica, sino que se puede aplicar su energía de forma directa en distintos ámbitos, y un ejemplo de ello es el horno solar que se trata en el presente trabajo. En este tipo de instalación se aprovecha el calor generado por la radiación solar, llegando a alcanzar temperaturas de trabajo muy altas gracias a la concentración de los rayos solares en un área determinada. Así, lo que requeriría de un alto gasto eléctrico para conseguir temperaturas tan elevadas, del orden de incluso 2000 °C, en el horno solar se consigue mediante sistemas de concentración, reduciendo así la energía necesaria a utilizar para alcanzar estos objetivos.

Este tipo de instalación, como es el horno solar, se utiliza para tratar distintos tipos de materiales, donde suele ser necesario que éstos se mantengan durante un período de tiempo a altas temperaturas hasta que el proceso finalice. Debido a que esta instalación se basa en la radiación solar directa en cada momento para alcanzar dichas temperaturas, es necesario diseñar una arquitectura de control adecuada que permita automatizar el proceso, ya que para un operario sería complicado estar corrigiendo en tiempo real las variaciones que puedan producirse en esta variable simplemente abriendo y cerrando la persiana que deja pasar la radiación, y porque además es necesario ser preciso a la hora de alcanzar la temperatura de la muestra deseada. Además, la aparición de nubes provocaría variaciones mucho mayores en la energía que la pieza recibe y por tanto deben ser contrarrestadas de forma inmediata para que el proceso de tratamiento de la pieza sea efectivo.

Por consiguiente, la motivación de este trabajo se basa en estudiar distintas estrategias de modelado y control que contribuyan a mejorar la eficiencia de esta instalación, basada en energía limpia y renovable.

1.2 Contexto y revisión bibliográfica

El contexto bibliográfico es muy extenso en este tipo de instalaciones. Este Trabajo de Fin de Máster se ha apoyado en trabajos anteriores como [1] y [2], en los que se explica en profundidad la instalación y donde se desarrolló la ecuación diferencial ordinaria en la que cual se basa este trabajo sobre un horno solar. En [3] se compararon las ganancias unitarias y constantes de tiempo del modelo de forma experimental para distintas muestras y se aplicaron técnicas de control basadas en el estudio del lugar de las raíces, que se comparan con el resultado de linealizar el modelo basado en la ecuación diferencial del horno, lo cual se ha hecho también en este trabajo. Además, se diseñó un control por

adelanto en serie capaz de rechazar las variaciones en radiación solar, considerada perturbación del sistema de control. Para el control adaptativo, se utilizó para identificar el modelo el método de mínimos cuadrados que permitía obtener parámetros del sistema que son desconocidos, lo cual representa un punto de diferencia con el presente trabajo, donde se ha aplicado un algoritmo genético basado en [4] para obtener los parámetros mencionados. Al igual que en [3], en [5] se aplicaron las mismas técnicas y se realizaron nuevos ensayos cuyos datos, al igual que algunos de los que se muestran en la bibliografía ya mencionada, se han utilizado en este trabajo para calibrar el modelo con un algoritmo genético y luego validarlo.

Por otra parte, ha sido necesario recurrir a [6], [7] y [8] a la hora de encontrar propiedades físicas de los materiales en los que antiguamente se trabajó en el horno, mientras que otros ejemplos como [9] o [10] que fueron trabajos específicos en un horno solar para la muestra de cobre sobre la que se ha trabajado también.

También se han tenido en cuenta los trabajos como [11] a la hora de intentar controlar el sistema en todo el rango de operación, o [12] para llevar a cabo estrategias donde se requerían conmutaciones entre distintos controladores para controlar un proceso en su rango de operación completo.

Finalmente, se comenta que este Trabajo Fin de Máster se ha realizado en la disciplina de la Automática, colaborando con el Grupo de Investigación Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM, TEP-197 del Plan Andaluz de Investigación) [13] de la Universidad de Almería. Una de sus líneas de trabajo se centra en el control de plantas termosolares. Actualmente la investigación relacionada se realiza en el marco de los proyectos “Control y gestión óptima de recursos heterogéneos en distritos productivos agroindustriales integrando energías renovables” (CHROMAE) (DPI2017-85007-R) [14], financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y el proyecto Microrredes para el autoabastecimiento solar de entornos productivos aislados (MICROPROD-SOLAR), P918PTE0258), de la Agencia Estatal de Investigación y la CYTED ERANET LAC.

1.3 Objetivo del trabajo

El objetivo del presente trabajo es el de abordar distintas técnicas o estrategias de modelado y control en un horno solar (en concreto, uno de los hornos solares de la Plataforma Solar de Almería).

En el ámbito del modelado de la instalación, en este trabajo se estudia la capacidad que poseen los algoritmos genéticos a la hora de calibrar un modelo de caja gris que consiga una solución de compromiso entre simplicidad y buen ajuste de la dinámica de este sistema, y su versatilidad a la hora de abordar distintas muestras que puedan estudiarse o tratarse en este tipo de hornos, con el objetivo de que calibrar un modelo sea un proceso automático y sencillo, dónde previamente sólo se conozca de la muestra a tratar algunas propiedades básicas del material tales como la masa, su calor específico, sus medidas, etc. mientras que otras, que no son fáciles de determinar, sean competencia del algoritmo genético que se presenta en este trabajo.

Se utilizarán, para analizar la fiabilidad del modelo diseñado, unos índices de funcionamiento, y se interpretarán los resultados que se obtengan en base a dichos índices.

Además, por la parte del control, se estudiarán distintas estrategias, basadas en controladores convencionales tipo PID, los cuales además vienen fuertemente influenciados por la radiación solar, una perturbación al sistema de control que se diseñará y que se estudiará la forma de rechazarla mediante el diseño de un control anticipativo. A la hora de diseñar el sistema de control, será necesario tener en cuenta las limitaciones del sistema tales como saturaciones en la señal de control o velocidades de apertura/cierre de la persiana del horno, que repercutirá en la necesidad de diseñar un mecanismo que evite comportamientos no deseados.

1.4 Resumen de resultados

1.4.1 Calibración y validación del modelo no lineal

Mediante la aplicación de un algoritmo genético, se han llevado a cabo muchos procesos de calibración para cuatro muestras distintas, que son el acero A316-L, la zirconia blanca, el cobre y el carburo de silicio. Una vez se realizaban estas calibraciones, se ha obtenido un valor medio de los parámetros estimados por el algoritmo, que se resume en la Tabla 1 para cada una de las muestras ensayadas.

Tabla 1. Resumen de los valores obtenidos de las distintas calibraciones para las distintas muestras, ya calibrados.

	α_a	α_c	α_e
Acero A316-L	0.4776	41.395	0.9002
Zirconia blanca	0.2719	47.340	0.2234
Sinterizado de cobre	0.03652	24.4767	1.0278
Carburo de silicio	0.1570	24.7772	0.7286

Estos valores de absorptividad, coeficiente de convección y emisividad han sido validados en ensayos distintos y se ha medido su validez mediante la aplicación de índices de funcionamiento.

1.4.2 Validación del modelo linealizado

La validación del modelo linealizado se ha llevado a cabo dividiendo el rango de operación de cada una de las muestras en distintos intervalos, según la variación de la ganancia y de la constante de tiempo del modelo linealizado para la radiación y la apertura de la persiana.

Como se ha dicho, para cada muestra por separado se ha dividido su rango de operación suficientes veces como para obtener modelos lineales que sean precisos y válidos para el rango de operación establecido. A continuación, se muestran los modelos lineales para cada una de las muestras, en la Tabla 2, Tabla 3,

Tabla 4 y Tabla 5, donde además se puede deducir la variedad de dinámicas que se dan en el horno solar para cada muestra, dados sus parámetros de los modelos lineales.

Tabla 2. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de acero A316-L.

Nº de modelo	Apertura de persiana (%)		Radiación (W/m ²)		Ganancia, k_U (°C/%)	Constante de tiempo, τ (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
1	0	3	1100	800	140.625	79
2A	0	3	800	500	101.875	79
2B	3	5	Todo el rango		101.875	79
3	5	9	Todo el rango		63.125	57
4	9	18	Todo el rango		34.063	35
5	18	32	Todo el rango		19.532	18.50
6	32	100	Todo el rango		9.845	9

Tabla 3. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de acero zirconia blanca.

Nº de modelo	Apertura de persiana (%)		Radiación (W/m ²)		Ganancia, k_U (°C/%)	Constante de tiempo, τ (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
1	0	15	1100	800	53.50	11.50
2	0	15	800	500	40.50	11.50
3	15	23	Todo el rango		40.50	8.50
4	23	38	Todo el rango		27.50	8.50
5	38	60	Todo el rango		17.75	5.50
6	60	100	Todo el rango		11.25	2.50

Tabla 4. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de cobre.

Nº de modelo	Apertura de persiana (%)		Radiación (W/m ²)		Ganancia, k_U (°C/%)	Constante de tiempo, τ (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
1	0	13	1100	800	21	931.25
2A	0	13	800	500	16	931.25
2B	13	20	Todo el rango		16	931.25
3	20	40	Todo el rango		11	693.75
4	40	60	Todo el rango		6	456.25
5	60	100	Todo el rango		6	218.75

Tabla 5. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de carburo de silicio.

Nº de modelo	Apertura de persiana (%)		Radiación (W/m ²)		Ganancia, k_U (°C/%)	Constante de tiempo, τ (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
1	0	3	1100	800	84.125	158.25
2	0	3	800	500	61.375	158.25
2B	3	7	Todo el rango		61.375	158.25
3	7	15	Todo el rango		38.625	114.75
4	15	27	Todo el rango		20.4375	71.25
5	27	40	Todo el rango		9.0625	37.125
6	40	100	Todo el rango		9.0625	15.375

Todos estos modelos mostrados han sido igualmente validados con sus índices de funcionamiento correspondientes.

1.4.3 Resultados de control

Los resultados de control se dividen en dos partes: los obtenidos mediante un diseño de error nulo en estado estacionario para cambios en la referencia en forma de escalón, y los obtenidos mediante un diseño de error nulo en estado estacionario para cambios en la referencia en forma de rampa.

- Error nulo frente a escalón

El error nulo frente a escalón se lleva a cabo con un PI junto a la técnica *antiwindup* para lidiar con las no linealidades en la apertura de la persiana, y con un control anticipativo o *feedforward*. Además, todo esto se lleva a cabo para todo el rango de operación mediante una arquitectura de control que conmuta entre controladores (cada uno diseñado para los modelos de la Tabla 2, Tabla 3,

Tabla 4 y Tabla 5) en función del punto de operación. Un esquema general de la arquitectura diseñada se muestra en la Figura 1.1, siendo de color amarillo el controlador por adelantado o *feedforward*, en azul un subsistema donde están implementados el banco de controladores PI para cada modelo lineal, y en naranja otro subsistema donde vienen implementadas las referencias a seguir por el sistema de control.

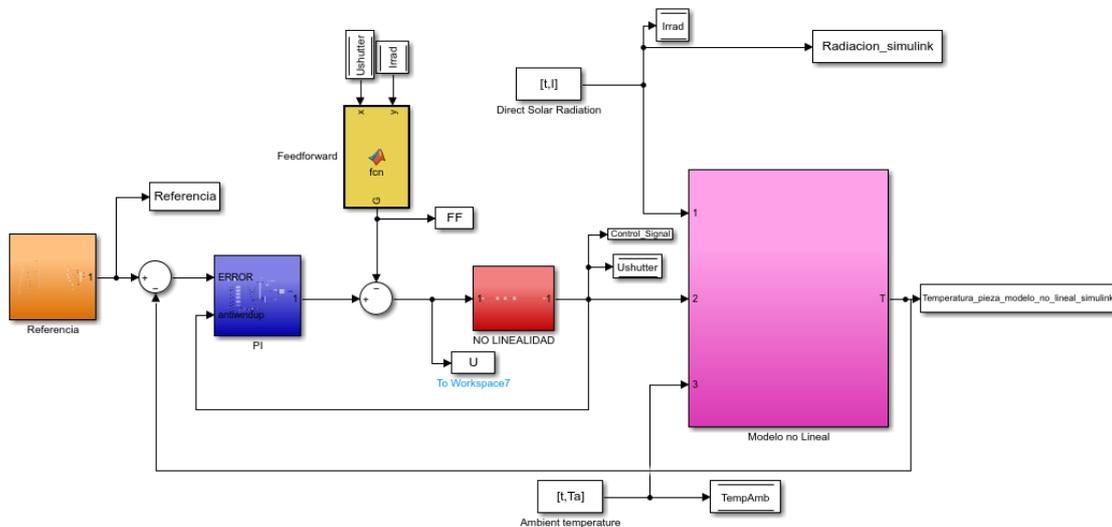


Figura 1.1. Esquema general final del controlador PI + antiwindup + controlador anticipativo.

Un ejemplo de su funcionamiento es el mostrado en la Figura 1.2, donde se barrió un amplio rango de operación para una señal de radiación variable en el tiempo, y donde se aprecia un error constante en régimen permanente en la rampa del final de la simulación.

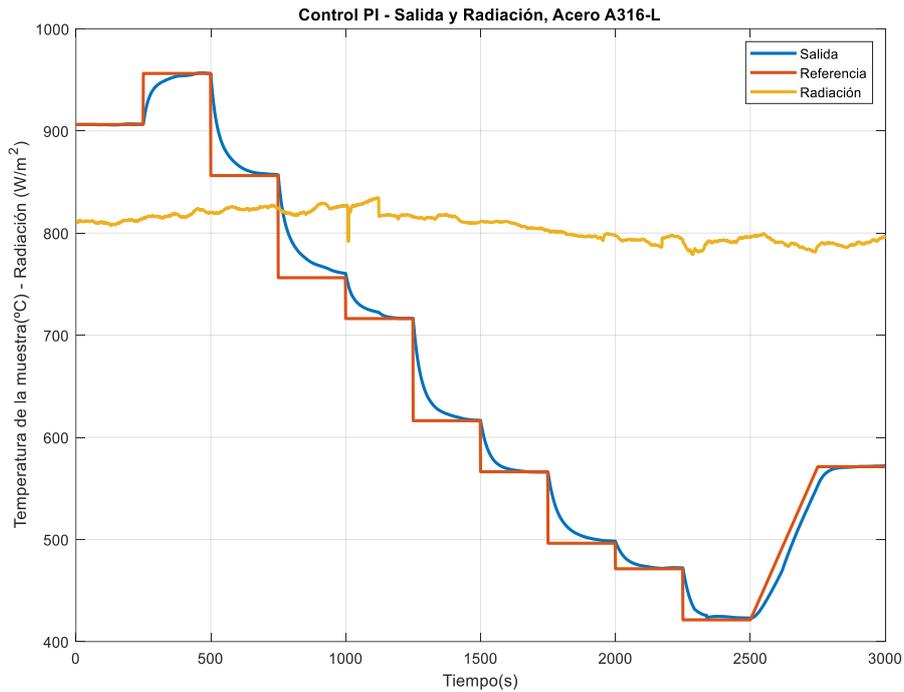


Figura 1.2. Ejemplo del resultado para la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

- Error nulo frente a rampa

El error nulo frente a rampa se lleva a cabo con dos controladores PI en serie, que al igual que en el diseño anterior, se complementan con un controlador por adelanto y el esquema *antiwindup* correspondiente. Un ejemplo del resultado se muestra a continuación en la Figura 1.3, donde se muestra cómo el error frente a referencia en rampa se hace nulo si se compara con el resultado mostrado anteriormente en la Figura 1.2. Además se muestra en la Figura 1.4 la diferencia entre la referencia y la salida, que es prácticamente cero (no llega a serlo dada la variación en la radiación y la escala de temperatura a la que se trabaja, de cerca de 1500 °C).

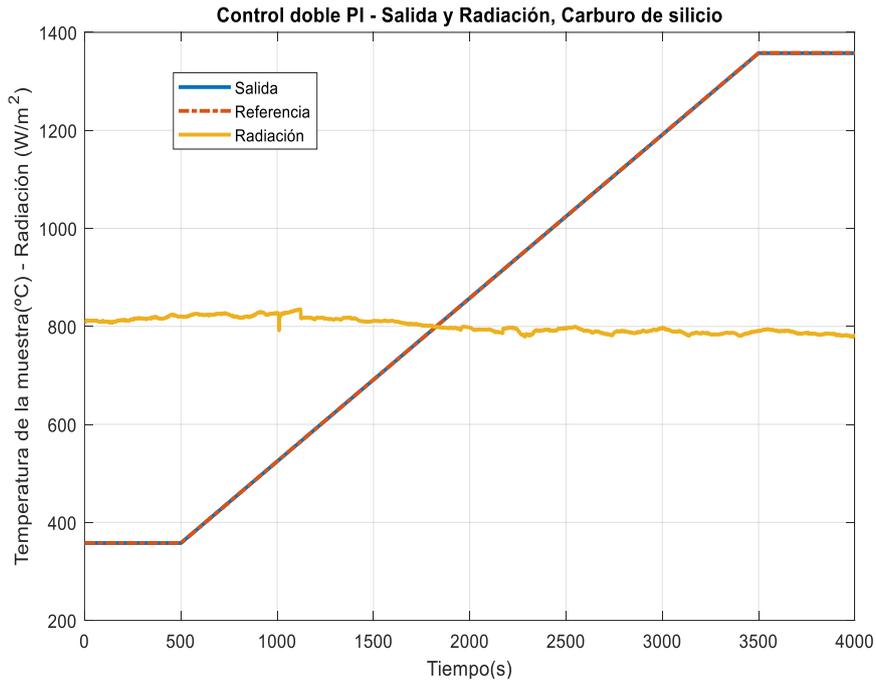


Figura 1.3. Ejemplo del resultado para la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

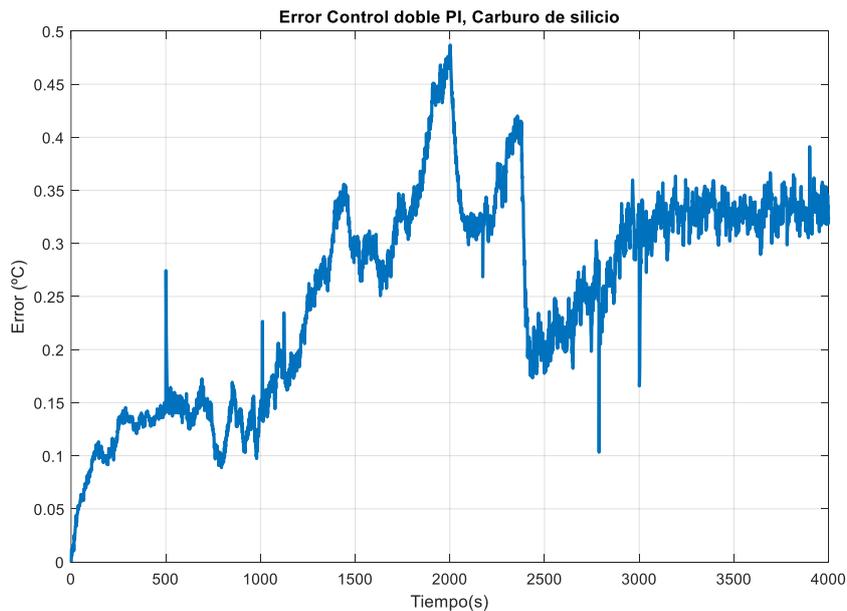


Figura 1.4. Ejemplo del resultado para la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Error entre la referencia y la salida.

- Combinación de arquitecturas de control

Finalmente se combinan los dos tipos de controladores anteriores, presuponiendo que se conoce previamente el perfil del ensayo en el horno. Por tanto, se lleva a la pieza a una temperatura determinada mediante una referencia en forma de rampa, y una vez en dicha temperatura, se le introducen varios escalones, para luego dejar enfriar la pieza de forma controlada con otra rampa en la referencia. Entre rampa y escalón se produce la conmutación entre un tipo de controlador y otro, dando el resultado que se muestra en la

Figura 1.5, donde se consigue un error nulo para ambos tipos de cambios en la referencia de temperatura. En la Figura 1.6 se muestra el error de dicha simulación donde se observa que se hace nulo tras los cambios en la referencia (tras el primer escalón se da un pico de error por una bajada brusca de la radiación, pues se trata de un día de ensayo con nubes).

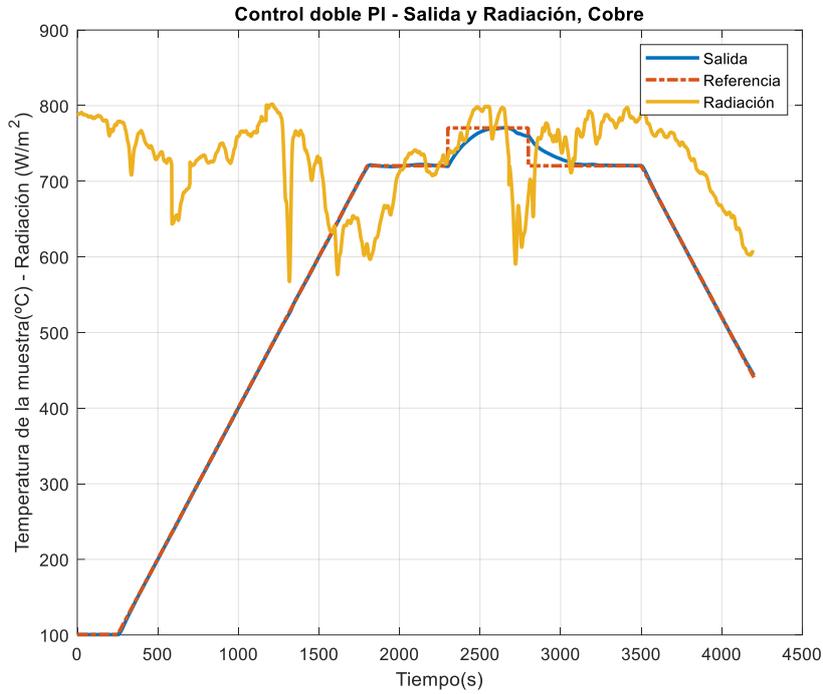


Figura 1.5. Ejemplo del resultado para la muestra de cobre. Combinación de controlador para rampa y controlador para escalón, con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

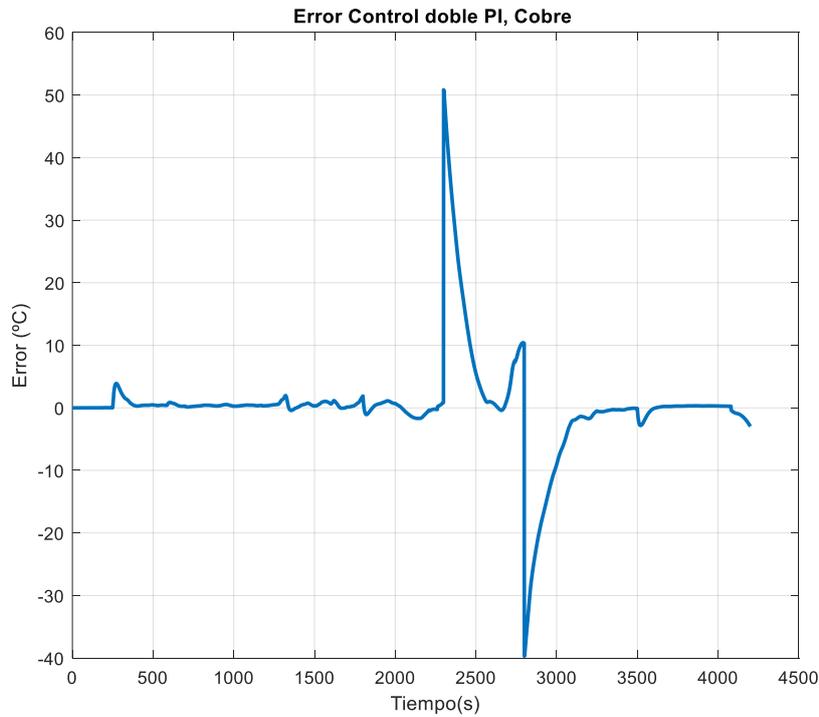


Figura 1.6. Ejemplo del resultado para la muestra de cobre. Combinación de controlador para rampa y controlador para escalón, con antiwindup y control anticipativo. Error entre salida y referencia.

1.5 Fases de desarrollo y planificación temporal

Para explicar correctamente cómo ha sido el desarrollo del presente trabajo, se aborda a continuación de forma separada las fases comprendidas en el desarrollo del trabajo y la planificación temporal del trabajo.

1.5.1 Fases de desarrollo del trabajo

Las fases seguidas para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) se pueden clasificar según las tareas que se han ido realizando y alcanzando. Estas tareas, siendo 7 en total, se enumeran a continuación:

1. Revisión bibliográfica: revisión de trabajos previos en el horno solar, con el objetivo de conocer profundamente el sistema a tratar y de las técnicas que se utilizan en este trabajo para alcanzar el objetivo deseado.
2. Modelización del horno solar: entender e implementar el modelo desarrollado en trabajos previos, así como la propia linealización del mismo y su alcance.
3. Tratado y acondicionamiento de datos de distintas piezas: esta parte comprende un arduo trabajo de revisión de grupos de datos, valoración de cuales son aptos o no para calibrar/validar, revisión de los datos sobre las distintas muestras para obtener sus parámetros característicos, etc. Ha sido una de las partes que más tiempo ha consumido.
4. Aplicación del algoritmo genético en la calibración del modelo no lineal. Esta parte es de las más importantes del TFM, puesto que se calibra el modelo no lineal utilizando datos reales de distintas muestras y se validan posteriormente con datos distintos. Además, se aplican índices de funcionamiento que miden la calidad de las validaciones realizadas.
5. Obtención de modelos lineales en base al modelo linealizado de la planta, para cada muestra de ensayo trabajada en el TFM. Además, esta linealización se estudia en todo el rango de operación de la muestra, obteniendo diversos modelos lineales. Estos modelos son validados para cada uno de los intervalos establecidos para los cuales se ha diseñado un modelo lineal.
6. Diseño de estrategias de control: en base a los modelos linealizados comentados en el punto anterior, se diseña en general dos arquitecturas de control. La primera para conseguir un error nulo ante un cambio en la referencia en escalón, y la segunda para conseguir un error nulo ante un cambio en la referencia ante una rampa. Además, estas arquitecturas incorporan la técnica *antiwindup* y un controlador por adelanto adaptativo para el rango de operación.

1.5.2 Planificación temporal del trabajo

El número de horas dedicadas al trabajo de fin de máster por parte del alumno se resume en la Tabla 6, donde se muestra la cantidad de horas aproximadas que se han dedicado por semana al presente trabajo desde que se empezó a trabajar en el mismo. Además, se acompaña esta tabla de un gráfico de barras (Figura 1.7) que muestra estas horas dedicadas por semana de una manera más intuitiva.

Tabla 6. Nº de horas dedicadas al trabajo fin de máster por semana por parte del alumno.

Nº DE SEMANA	PERIODO COMPRENDIDO	Nº DE HORAS
1	15/03 - 22/03	5
2	22/03 - 29/03	5
3	29/03 - 05/04	5
4	05/04 - 12/04	10
5	12/04 - 19/04	10
6	19/04 - 26/04	15
7	26/04 - 03/05	15
8	03/05 - 10/05	20
9	10/05 - 17/05	20
10	17/05 - 24/05	25
11	24/05 - 31/05	25
12	31/05 - 07/06	25
13	07/06 - 14/06	25
14	14/06 - 21/06	5
15	21/06 - 28/06	5
16	28/06 - 05/07	25
17	05/07 - 12/07	25
18	12/07 - 19/07	15
19	19/07 - 26/07	15
20	26/07 - 02/08	15
	TOTAL	310

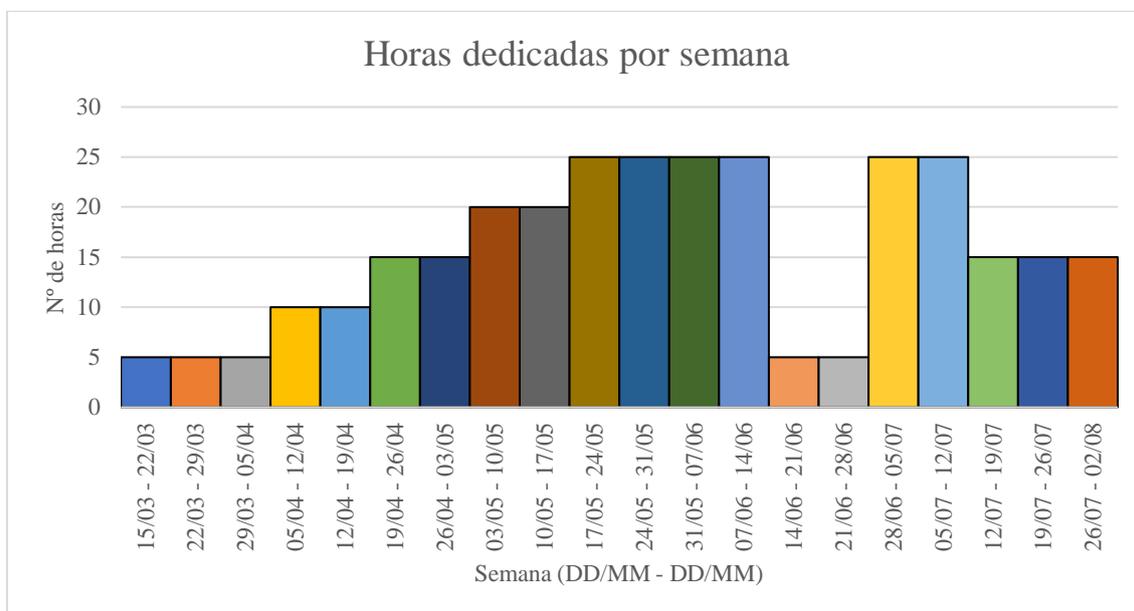


Figura 1.7. Resumen de horas dedicadas al trabajo fin de máster por parte del alumno.

Se puede observar un valle en las dos semanas finales de junio, debido a que se le tuvo que dedicar menos tiempo al trabajo de fin de máster para poder atender otros exámenes restantes.

1.6 Estructura de la memoria

La memoria de este trabajo de fin de máster está organizada en 5 capítulos:

1. **Introducción:** en ella se explica la motivación del TFM, los objetivos, se realiza un breve resumen de los resultados obtenidos en el trabajo, y se explica las fases de desarrollo del trabajo y la planificación temporal del mismo. Además, se incluye este punto donde se revisa la estructura de la propia memoria.
2. **Materiales y métodos:** en este punto se explican los materiales utilizados en el trabajo y los métodos que se han empleado para obtener los resultados que se mostrarán posteriormente en el capítulo siguiente. En el caso de este TFM, se hará una descripción de la instalación del horno solar del PSA, el modelo no lineal asociado y su linealización, así como los métodos seguidos para modelar y controlar el modelo no lineal de la instalación para distintos tipos de piezas.
3. **Resultados y discusión:** en este punto se muestran los resultados obtenidos en los distintos ensayos de calibración del modelo no lineal para las distintas muestras estudiadas, así como la validación de los modelos lineales para cada rango de operación establecido. Además, se mostrarán los resultados de control de los distintos diseños llevados a cabo para satisfacer los diferentes objetivos del trabajo.
4. **Conclusiones y líneas futuras:** en esta parte se hará una valoración de los resultados obtenidos y de las conclusiones que se han ido deduciendo de los resultados tras haber aplicado la metodología correspondiente. Además, se comentará y se hará una valoración de cuáles pueden ser las líneas futuras a estudiar para terminar de completar y mejorar lo estudiado en este TFM
5. **Bibliografía:** en este punto se mostrará, como su nombre indica, las citas bibliográficas en las que ha sido apoyado este trabajo.

2 Materiales y métodos

2.1 Descripción del horno solar de la PSA

El horno solar que se trata en este trabajo es una instalación que se encuentra en la Plataforma Solar de Almería (PSA), uno de los centros tecnológicos más importantes para el estudio y la investigación en el aprovechamiento de la energía solar a nivel mundial.

La principal tarea que se lleva a cabo en estos hornos es la del tratamiento de distintas muestras de materiales, con el objetivo de mejorar las propiedades de los materiales en cuestión.

El horno solar de la PSA ([2], [1], [3]) se compone de varios elementos principales:

- Helióstatos, 4 en total, que reciben y reflejan la radiación solar sobre el colector. Estos heliostatos poseen cada uno un área de 56.61 m^2 y están controlados de forma autónoma por un ordenador principal para que sigan la trayectoria solar. Además, poseen una reflectividad de en torno a un 90 %. Como se ha comentado, este sistema de seguimiento es autónomo pues se basa en la trayectoria relativa entre la Tierra y el Sol y en la latitud y longitud de la ubicación de la instalación, y por tanto no será un aspecto a tener en cuenta en este trabajo.
- Una persiana o *shutter*, su denominación en inglés, que se controla mediante un ordenador y que en el caso del presente trabajo será la señal de control manipulable del sistema. Esta persiana está formada por 30 paneles, que mediante sus 15896 posiciones que varían entre 0° y 55° (abierto y cerrado, respectivamente) regulan la radiación incidente en el colector. Los paneles tienen unas medidas en conjunto de $11.5 \text{ m} \times 11.2 \text{ m}$.
- El captador esférico, que recibe la radiación reflejada por los heliostatos y la refleja a su vez sobre la muestra o pieza colocada en la mesa de trabajo. Este captador consiste en 89 facetas tipo sándwich (de 0.91 m por 1.21 m cada una) que les brinda una reflectividad de un 94 %.
- La mesa de trabajo, lugar donde se disponen las piezas. Esta mesa es desplazable en las 3 dimensiones del espacio, en las direcciones XYZ, por un rango pequeño y limitado, y se mueve de forma manual con unos cursores para colocar las piezas correctamente antes de los ensayos.

Esta descripción se complementa de forma esquemática con la Figura 2.1. donde se pueden observar todos los elementos nombrados, y la trayectoria de la radiación solar de forma simplificada.

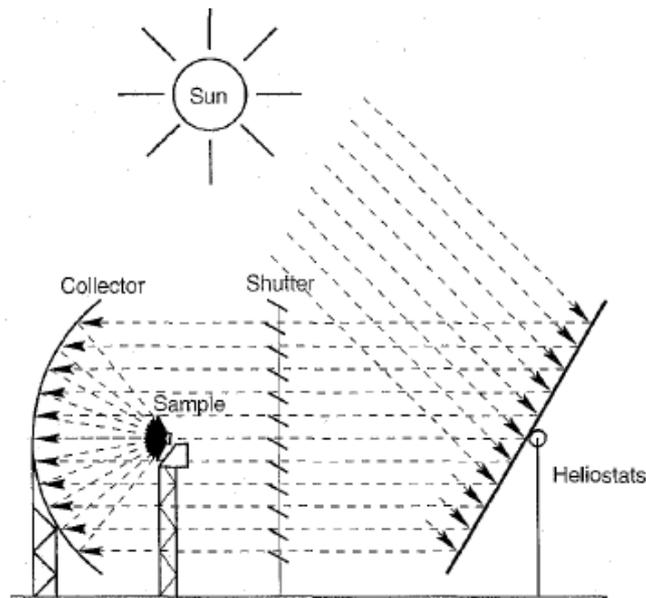


Figura 2.1. Esquema simplificado del sistema [3].

2.2 Ecuaciones físicas que modelan la dinámica del horno solar e implementación del modelo no lineal.

2.2.1 Descripción de la ecuación del modelo

El sistema descrito anteriormente se puede modelar en base al principio de conservación de la energía, como ya se hizo en [1] y [2]. Sabiendo que la derivada de la energía en función del tiempo equivale la potencia, se puede establecer la siguiente relación (ecuación (2.1)), tal y como se explica fundamentalmente en [3]:

$$P_i - P_r - P_c = \frac{dE}{dt} \quad (2.1)$$

Donde: P_i es la potencia de entrada que recibe la pieza; P_r representa las pérdidas por radiación; P_c representa las pérdidas por convección; y, por último, E es la energía térmica de la pieza. Estos términos se desarrollan a continuación con el objetivo de obtener un modelo energético de la pieza lo más completo posible.

- Potencia de entrada.

Dado que la variable que ofrece el programa de control en el horno es el porcentaje de apertura de la persiana, esta variable debe reconvertirse a un valor que sea capaz de leer el motor. Se conoce, tal y como se explicó en el punto anterior, que la persiana puede abrirse en un rango de 0 a 55°, siendo la posición de 55° de totalmente cerrado y la de 0° totalmente abierto. Por tanto, el área de apertura, $A(t)$, se relaciona con el ángulo de apertura $\alpha(t)$ de la siguiente forma:

$$A(t) = L \cdot (\text{sen } \alpha_0 - \text{sen } \alpha(t)) \quad (2.2)$$

Siendo L la longitud de la persiana y α_0 el ángulo de 55° que representa la persiana totalmente cerrada.

Por otra parte, dado que el motor posee un encoder, la señal que recibe (representada por la variable $U(t)$) se expresa mediante la ecuación (2.3):

$$U(t) = 100 \cdot \left(\frac{\alpha_0 - \alpha(t)}{\alpha_0} \right) \quad (2.3)$$

Por tanto, relacionando las ecuaciones (2.2) y (2.3), se obtiene la siguiente expresión, que relaciona la salida del programa de control con la señal que entra al motor:

$$A(t) = 1 - \frac{\text{sen} \left(\left[1 - \frac{U(t)}{100} \right] \cdot \alpha_0 \right)}{\text{sen} \alpha_0} \quad (2.4)$$

Esta variable $A(t)$ modulará o atenuará la cantidad de radiación que entrante a la pieza.

El siguiente factor que interviene en la radiación que llega a la pieza es la reflectividad de los heliostatos. Por tanto, la radiación que llegue al concentrador será la radiación incidente en ese momento en los heliostatos, $I(t)$, por la reflectividad de estos, ρ_h . La radiación que llegue a la pieza dependerá a su vez de la reflectividad del propio concentrador solar (ρ_c). Por tanto, el desarrollo anteriormente explicado correspondería con el que se muestra a continuación:

$$P(t) = I_c \cdot S_c \cdot \rho_c = I(t) \cdot \rho_h \cdot \rho_c \cdot S_c \cdot A(t)$$

Siendo S_c el área del colector o concentrador, I_c la radiación que llega al colector y P la potencia solar incidente y aprovechable. Sin embargo, la potencia que es capaz de aprovechar la pieza depende de más factores, como es la capacidad de la misma muestra para absorber la radiación sola; la forma en la que se distribuye la radiación en el área de la muestra; la propia área o superficie que posee la muestra de ensayo, etc. En conclusión, desarrollando la ecuación anterior (introduciendo la variable $A(t)$, ecuación (2.4), y desarrollando) y aplicando las premisas comentadas, la ecuación resultante que modela la potencia que absorbe la pieza es la siguiente:

$$P_i(t) = \frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_{f(90\%)} \text{sen} \alpha_0} \cdot I(t) \cdot S_s \cdot \alpha_a \left(\text{sen} \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{U(t)}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) \quad (2.5)$$

Siendo: $S_{f(90\%)}$ el área donde se concentra la mayor radiación (se considera que el 90 % de la radiación incidente se concentra en un área de diámetro aproximado 20 cm [3]); α_a es el coeficiente de capacidad de absorción solar de la muestra o pieza de ensayo. Como se puede observar, la ecuación (2.5) presenta una no-linealidad debido a que la atenuación del flujo de radiación de entrada sigue una relación sinusoidal respecto de la señal de entrada $U(t)$.

Más adelante en este trabajo, se denomina como K_1 al término de la ecuación (2.5) que es independiente de la muestra de ensayo, y que consiste en:

$$K_1 = \frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_{f(90\%)} \text{sen } \alpha_0} \quad (2.6)$$

Siendo aproximadamente $K_1 = 2495$, tal y como se explica en [3].

- Pérdidas por radiación.

La radiación es una de las 3 formas de intercambio de calor existentes (conducción, convección y radiación), y estas pérdidas de radiación en forma de potencia térmica son estudiadas a continuación. La siguiente ecuación define las pérdidas que se producen en un material debido a la irradiación de potencia de la muestra:

$$P_r(t) = \alpha_e \sigma S_s (T^4(t) - T_a^4(t)) \quad (2.7)$$

Siendo: α_e la emisividad del material, entre 0 y 1; σ la constante de Stephan-Boltzmann, cuyo valor es $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$; T es la temperatura de la muestra de ensayo; y por último, $T_a(t)$ es la temperatura del entorno o temperatura ambiente.

La ecuación (2.7) recientemente presentada posee dos no linealidades, debidas a la elevación a la cuarta potencia de las temperaturas, tanto ambiente como la de la propia muestra de ensayo.

- Pérdidas por convección.

Las pérdidas por convección dadas en la pieza se producen debido al intercambio de calor de la muestra de ensayo con el aire. La potencia que se pierde debido al intercambio de calor por convección se aproxima con la siguiente ecuación:

$$P_c(t) = \alpha_c S_s (T(t) - T_a(t)) \quad (2.8)$$

Donde α_c es un coeficiente que modela la capacidad de intercambio de calor de la muestra de ensayo con el aire (de esto depende factores como la posición de la muestra, temperatura del aire, viscosidad, etc.); S_s el área de la pieza; y T y T_a la temperatura de la muestra y la temperatura ambiente, respectivamente.

- Energía térmica de la pieza.

La variable que queda por desarrollar es la correspondiente a la derivada de la energía térmica de la pieza. La energía térmica de la pieza es la siguiente:

$$E = m_s \cdot c_s \cdot T(t) \quad (2.9)$$

Donde m_s es la masa de la muestra de ensayo, c_s la capacidad de transferencia de calor del material y $T(t)$ la temperatura de la muestra.

Finalmente, si se introducen las ecuaciones presentadas con anterioridad (ecuaciones (2.5)(2.5), (2.7), (2.8) y (2.9)) en la ecuación (2.1), se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_f(90\%) \text{sen } \alpha_0} I(t) S_s \alpha_a \left(\text{sen } \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{U(t)}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) - \alpha_e \sigma S_s (T^4(t) - T_a^4(t)) - \alpha_c S_s (T(t) - T_a(t)) = \frac{d}{dt} (m_s c_s T(t)) \quad (2.10)$$

Esta ecuación es en la cual se basa este trabajo, pues es la que se ha utilizado para elaborar los modelos de las distintas muestras de ensayo, y en base a ellos, se han diseñado las correspondientes estrategias de control.

2.2.2 Implementación en MATLAB del modelo no lineal

Una vez se ha desarrollado la ecuación (2.10) que modela el horno solar, se procede a implementar este modelo no lineal en SIMULINK, un entorno de programación de alto nivel dentro del programa MATLAB.

MATLAB es el software sobre el cual se ha basado este trabajo, pues con él se ha podido implementar el modelo del horno, aplicar el algoritmo genético, tratar distintos datos, realizar simulaciones y cálculos complejos. En general, se trata [15] de un software muy utilizado debido a su gran potencial de programación, análisis de datos, cálculo y muchas funciones más, que además pueden ser ampliadas gracias a la posibilidad de incluir a posteriori distintas librerías o *toolboxes*, en inglés. Este software además ofrece la posibilidad de trabajar en un entorno de programación de más alto nivel llamado SIMULINK, donde en vez de trabajar con código, se trabaja con conexiones mediante flechas de distintos bloques que poseen funciones diferentes y que permiten ajustar parámetros internos. Esto permite de forma más intuitiva implementar desde circuitos eléctricos hasta incluso el modelo del horno solar basado en la ecuación diferencial (2.10) que se explicó anteriormente, y que cuya implementación se presentará a continuación.

Primeramente, se muestra una vista general del modelo (ver Figura 2.2), con sus distintas entradas (temperatura ambiente, radiación solar y apertura de la persiana) y la salida (temperatura de la muestra de ensayo). En verde aparece el bloque en cuyo interior se encuentra implementado la ecuación (2.10) del modelo, que tal y como se observa posee tres entradas y una salida; la salida, correspondiente a la temperatura de la muestra de ensayo, se guarda en el espacio de trabajo o *workspace* gracias al bloque coloreado de color magenta; respecto a las entradas, en este esquema vienen implementadas a modo de ejemplo como bloques que cargan datos del espacio de trabajo (para por ejemplo cargar datos reales de ensayos ya existentes), y se definen a continuación:

- En el bloque en color amarillo, la radiación solar.
- En el bloque en color naranja, la temperatura ambiente.
- En el bloque azul cian (entre los dos anteriores), la apertura de la persiana.

El bloque de color rojo, conectado seguido del bloque que carga los datos de la apertura de la persiana, es el que contiene las no linealidades presentes en el horno y que no están incluidas en la ecuación (2.10), y que por tanto deben ser implementadas de forma externa. El interior de este bloque se muestra en la Figura 2.3. En ella, se hace pasar la señal de apertura de la persiana (con un rango de 0 a 100 %) por el bloque *Quantizer*, que representa el encoder del motor de la persiana ya que no se trata de una señal continua (representa la resolución del mismo, presentando 15896 dentro de ese rango de 0 a 100%). El siguiente bloque, llamado *Rate Limiter*, es el que limita la velocidad de apertura (o

cierre) de la persiana a un máximo de 5 % por segundo, siendo una de las no linealidades más restrictivas del horno, como se irá viendo en el trabajo. Por último, el bloque *Saturation*, que como su nombre bien indica, es el que se encarga de saturar la señal de apertura de la persiana a sus límites físicos, de 0 a 100 %.

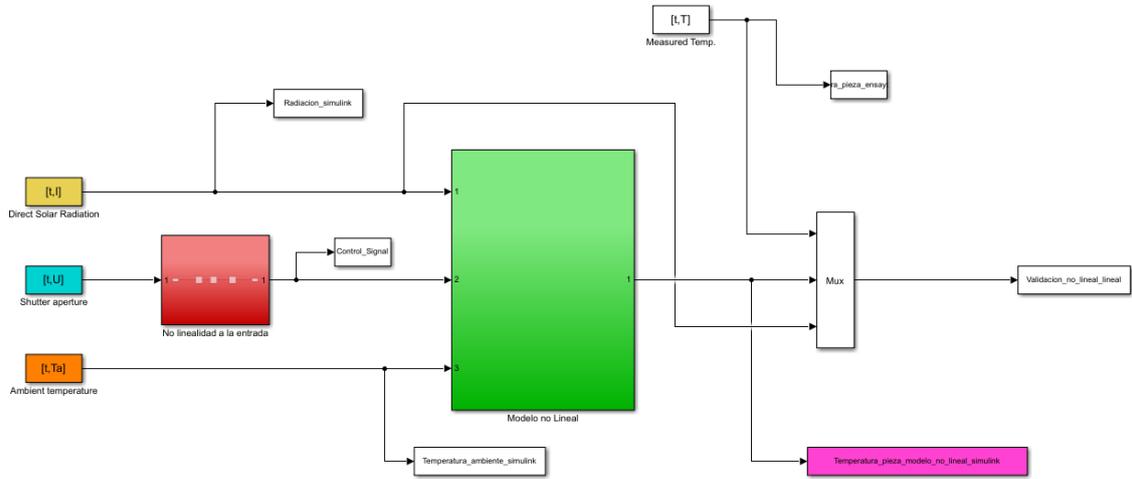


Figura 2.2. Diagrama de bloques de SIMULINK de la vista general del modelo.

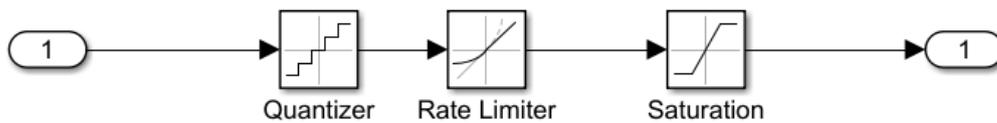


Figura 2.3. No linealidades en la señal de apertura de la persiana, que se implementan previamente a la ecuación (2.10) del modelo.

Una vez explicado la implementación externa de las señales que entran y salen del modelo, se muestra a continuación la implementación de la ecuación (2.10), es decir, la vista interna del bloque de color verde mostrado anteriormente en la Figura 2.2. Esta vista en detalle se muestra en la Figura 2.4 en la cual se aprecia como a la izquierda del todo están las entradas al modelo.

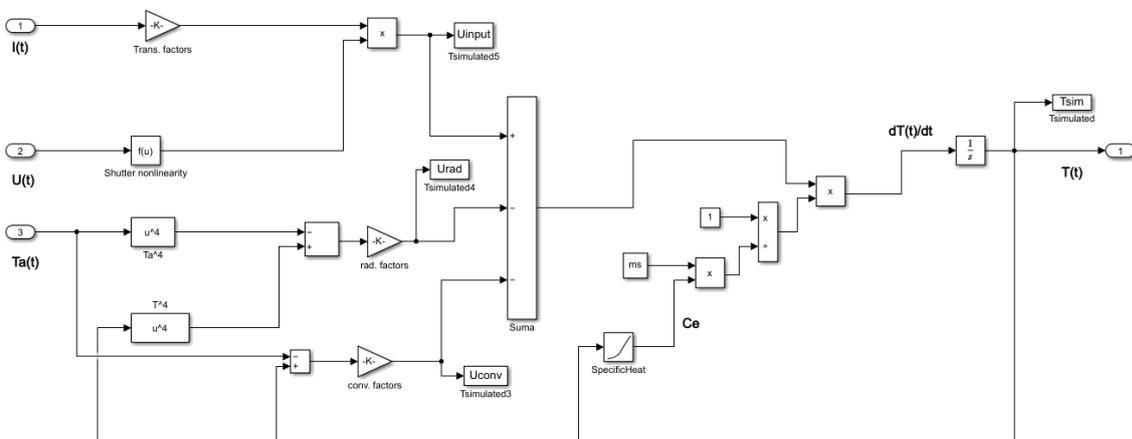


Figura 2.4. Vista en detalle de la implementación del modelo no lineal en SIMULINK.

A continuación, se analiza de forma detallada la implementación del modelo no lineal expuesta en la Figura 2.4.

La primera entrada al modelo, empezando por arriba, es la radiación $I(t)$, que se multiplica por el factor K_1 (expuesto en la ecuación (2.6), independiente de la muestra de ensayo), la superficie de la muestra S_s y el factor α_a dentro del bloque de ganancia.

La siguiente entrada que hay debajo es la apertura de la persiana $U(t)$ (a la que se le han aplicado las 3 no linealidades explicadas anteriormente en la Figura 2.3) que entra dentro de un bloque *function*, en el cual la variable de entrada a dicho bloque se convierte en variable independiente de la siguiente función, dando como salida del bloque la siguiente expresión, que como se aprecia, corresponde con una parte de la ecuación (2.5) que define la potencia de entrada al modelo:

$$Y = fcn(u) = \text{sen } \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{u(t)}{100} \right) \alpha_0 \right];$$

Por lo tanto, las operaciones resultantes explicadas anteriormente para la radiación $I(t)$ y la apertura de la persiana $U(t)$ se multiplican entre sí dando como resultado finalmente la ecuación (2.5), que seguidamente se suma a las otras dos ecuaciones (2.7) y (2.8), que se explican a continuación.

Estas últimas dos ecuaciones se implementan a través de la última entrada al modelo que es la temperatura ambiente $T_a(t)$, que para implementar la ecuación (2.7), correspondiente a las pérdidas por radiación, se eleva la señal de $T_a(t)$ a la cuarta potencia y se le resta a la temperatura de la muestra $T(t)$ también a la cuarta potencia (que como se aprecia, la temperatura de la muestra de ensayo $T(t)$ corresponde a la salida del bloque integrador, a la derecha del esquema). El resultado de esta diferencia de temperaturas, cada una de ellas elevada a la cuarta potencia, se introduce en un bloque de ganancia que lo multiplica por la emisividad de la muestra α_e , la constante de Stephan-Boltzmann σ y la superficie de la muestra de ensayo S_s ; todo este resultado es, como se puede observar, el correspondiente a la ecuación (2.7), que entra restando a la derivada respecto del tiempo del balance energético, como en la ecuación (2.1). Finalmente, construir la ecuación (2.8) correspondiente a las pérdidas por convección es sencillo pues simplemente se resta la temperatura de la muestra de ensayo $T(t)$ a la temperatura ambiente $T_a(t)$, y el resultado de esta diferencia se introduce en un bloque de ganancia que lo multiplica por el coeficiente de convección α_c y la superficie de la muestra S_s ; este resultado es introducido restando en el balance energético de la parte izquierda de la ecuación (2.10).

Finalmente, la salida del bloque donde se realiza la suma y resta de los 3 términos que representan la parte izquierda de la ecuación (2.10) se dividen entre la masa de la muestra m_s y el calor específico del material de la muestra c_s (este último no es una constante como tal, sino que se trata de un bloque *look-up table* en función de la temperatura de la muestra en cada momento, ya que realmente c_s es dependiente de ésta); esta operación se hace con el objetivo de despejar de la ecuación (2.10) la derivada de la temperatura de la muestra respecto del tiempo, $\frac{dT(t)}{dt}$, ya que así finalmente se puede aplicar el bloque integrador y obtener la temperatura de la muestra de ensayo, correspondiente a la salida del modelo no lineal.

2.3 Calibración del modelo no lineal: Algoritmo genético

Tal y como se explica en [3], ciertos valores de la muestra estudiada que aparecen en el modelo no lineal no son fáciles de estimar, a diferencia de otros como la masa, el calor específico, superficie de la pieza, etc. que si son medibles antes de la simulación. Observando la ecuación (2.10), hay 3 parámetros que son difíciles de estimar y es necesario ajustar para calibrar el modelo correctamente: α_a , α_c y α_e . Se debe aclarar que realmente estos parámetros se suponen constantes con la temperatura de trabajo a modo de simplificar el modelo, aunque suponga asumir un error de modelado [3].

Con el objetivo de calibrar adecuadamente el modelo, se utiliza en el presente trabajo lo que se conoce como algoritmo genético [4]. Este algoritmo busca en definitiva la mejor combinación de las incógnitas (en este caso, α_a , α_c y α_e) en un intervalo de valores impuesto por el usuario. Esta mejor combinación, o en términos del algoritmo, una mejor adaptación al entorno, se establece mediante la optimización de la siguiente función de adaptación:

$$f(T) = \sqrt{(T_{real} - T_{sim})^t \cdot (T_{real} - T_{sim})} \quad (2.11)$$

Siendo T_{real} la temperatura real del ensayo con el que se compara el modelo, y T_{sim} la temperatura que devuelve el modelo no lineal para unos determinados valores de los parámetros que se quieren estimar. Esta operación se realiza de dicha manera pues T_{real} y T_{sim} son matrices o vectores de X filas y una columna, y por tanto de dicha operación lo que se obtendrá es un escalar. Por tanto, el objetivo del algoritmo genético será buscar la mejor combinación de α_a , α_c y α_e que minimice la función representada por la ecuación (2.11).

Los pasos que sigue el algoritmo genético [4] (de forma resumida) son los siguientes:

1. Establecer una población inicial, N , de individuos, siendo cada individuo combinaciones de valores aleatorios de las variables en los intervalos dados.
2. De todas ellas se identifica la adaptación al medio de cada individuo; en este caso, la adaptación implicará un menor error entre la temperatura de la muestra simulada para cada individuo y la temperatura que se obtuvo en ensayos reales en el horno solar, mediante la función expuesta anteriormente (ver ecuación (2.11)).
3. Tras obtener esta población inicial e identificar los individuos que mejor se adaptan al medio, se pasa a la siguiente generación donde previamente se realizan 3 tipos de operaciones: selección o reproducción, cruce, y mutación. La mutación consiste en alterar o modificar algún valor de la población anterior; a su vez, el cruce consiste (como su propio nombre indica) en cruzar o combinar individuos de la población; y por último, la selección, donde directamente se seleccionan los mejores individuos.
4. En la nueva generación se evalúa la adaptación al medio de la población (paso número 2) y así hasta evaluar todas las generaciones.

A continuación, se explica de forma más detallada cuáles son los mecanismos que utiliza este algoritmo en concreto, es decir, el utilizado en el presente TFM, para obtener las nuevas generaciones con el objetivo de acercarse lo máximo posible a un mínimo en la

función de adaptación al medio (ecuación (2.11)). Todas estos mecanismos están gobernados por ecuaciones descritas en [4].

Primeramente, se explican los mecanismos u operadores de cruce, que se han utilizado 3 distintos:

- ❖ Cruce aritmético: esta operación implica realizar una interpolación entre dos individuos (o “padres, en términos del algoritmo) de la población. Los dos “hijos” resultantes son valores aleatorios pertenecientes a dicha recta de interpolación.
- ❖ Cruce heurístico: esta operación implica también una interpolación entre dos individuos “padres” de la población, pero los dos hijos resultantes se encontrarán en dicha recta de interpolación hacia el exterior, en la dirección del padre que tenía mejor adaptación al entorno.
- ❖ Cruce simple: esta operación implica realizar un cruce aleatorio de un solo punto entre los dos “padres”, dando dos “hijos” como resultado.

Se observa cómo en los mecanismos de cruce explicados, el heurístico busca acercarse a un mínimo en la función de adaptación al entorno, mientras que el cruce simple y el aritmético es un cruce aleatorio entre los dos individuos iniciales; esto implica que el algoritmo genético no se quedará buscando solamente alrededor de un mínimo que podría ser un mínimo local, sino que para el intervalo dado con mucha probabilidad a lo largo de las sucesivas generaciones encontrará el mínimo global (siempre por supuesto dependiendo de las condiciones impuesta respecto a límites del intervalo, población inicial y número de generaciones).

Respecto a los mecanismos de mutación:

- ❖ Mutación límite, o en inglés, *boundary mutation*, donde se sustituye uno de los parámetros de los “padres” (individuo de la población actual) por uno de los valores límite (inferior o superior, aleatoriamente) del intervalo impuesto por el usuario.
- ❖ Mutación uniforme: mecanismo que sustituye uno de los parámetros del “padre” por un parámetro obtenido según una distribución uniforme de probabilidad en función de los límites dados por el usuario.
- ❖ Mutación no uniforme: mecanismo que sustituye uno de los parámetros del “padre” por un parámetro obtenido según una distribución no uniforme de probabilidad. Esta distribución Gaussiana comienza amplia y se va reduciendo a una distribución puntual a medida que la generación actual se acerca a la máxima, por lo que se escogen valores de los parámetros estimados cercanos a los límites impuestos por el usuario.
- ❖ Mutación no uniforme múltiple: este mecanismo de mutación realiza la misma mutación que la mutación anterior (basada en la distribución de probabilidad no uniforme) pero en todos los parámetros a la vez.

Respecto a los mecanismos de selección, se han utilizado los siguientes:

- ❖ Individuos de la generación (o padres) que mejor se adaptan.
- ❖ Selección geométrica normal, mecanismo por el cual se eligen individuos de entre la población en base a una distribución normal geométrica normalizada,

obteniendo así individuos seleccionados de la población en base a una función de probabilidad, siendo los más probables los mejor adaptados al medio.

Por otra parte, los materiales o tipos de muestras que se han tratado en este trabajo han sido 4, que son:

- Zirconia blanca (ZrO_2),
- Acero A316-L,
- Carburo de silicio (SiC),
- Conjunto de cables de cobre.

Es necesario aclarar que se poseía información de otras muestras, pero se ha decidido coger estas dado que por ejemplo la muestra de acero A316L y la de zirconia blanca poseen dinámicas que se podrían decir límite entre las distintas muestras que se tienen; la muestra de cobre ha sido escogida por su parte debido a la gran cantidad de datos e información general que se poseen de los distintos ensayos que se realizaron con ella, y por último la muestra de silicio ha sido escogida con el objetivo de tener finalmente 4 tipos distintos de muestras y obtener así variedad de dinámicas para el mismo modelo no lineal en el trabajo. En total, tal y como se refleja en la Tabla 7, se disponen de los siguientes días de ensayo reales (tras descartar muchos otros) para calibrar o validar el modelo no lineal, según la pieza o muestra:

Tabla 7. Datos de días de ensayo reales utilizados según la muestra para la calibración y validación del modelo no lineal.

Acero A316-L	Zirconia blanca	Cables de cobre	Carburo de silicio
21 de febrero de 1997	26 de febrero de 1997	8 de mayo de 2012	30 de julio de 1996
24 de febrero de 1997	27 de febrero de 1997	9 de mayo de 2012	7 de julio de 1998
25 de febrero de 1997	03 de marzo de 1997	10 de mayo de 2012	8 de julio de 1998
06 de marzo de 1997	04 de marzo de 1997	11 de mayo de 2012	-

Además, se recoge en la Tabla 8 la dependencia o no dependencia de cada uno de los parámetros del modelo con la muestra de ensayo, con el fin de argumentar lo mucho que depende el modelo no lineal en cada ensayo del tipo de muestra utilizada. Es evidente que la dinámica que poseerá el modelo no lineal depende de la muestra de ensayo con la que se trabaje, pero es importante tenerlo presente ya que, cómo se estudiará posteriormente en la linealización del modelo, esto afectará a la dinámica del modelo linealizado para cada pieza ya que la ganancia y constante de tiempo del modelo lineal dependen de los parámetros presentados en la Tabla 8. Esta diferenciación entre las dinámicas repercutirá finalmente, como es lógico, en los parámetros de los controladores que se diseñen.

Tabla 8. Dependencia de las distintas variables y parámetros con la muestra de ensayo.

Independientes de la muestra de ensayo	Dependientes de la muestra de ensayo
ρ_h	m_s
ρ_c	c_s
S_c	S_s
$S_{f(90\%)}$	α_a
α_0	α_c
σ	α_e

Respecto a los materiales utilizados, todos ellos fueron tratados en su momento en el horno solar de la PSA para distintos fines, y los datos generados en dichos ensayos donde se aplicaron distintos tipos de controladores (como se observa por ejemplo en [3] ó [16]) y se analizaron sus resultados son los que se han utilizado para calibrar el modelo no lineal presentado en el anterior subcapítulo.

De todos los datos disponibles para poder realizar este trabajo, es necesario aclarar que muchos tuvieron que ser descartados debido a diversas razones, como por ejemplo que estaban incompletos (no había registros de la apertura de la persiana), o contenían ensayos que no eran aprovechables debido a que hubo cortes durante los ensayos y no se puede recoger información suficiente de la dinámica real de la pieza, entre otras cosas.

A la hora de calibrar el modelo no lineal mediante la aplicación del algoritmo genético, siempre se ha realizado primeramente una simulación con una población inicial de 1000 individuos y 20 generaciones, intentando “barrer” las posibilidades de combinación de los 3 parámetros para encontrar un intervalo más pequeño (se reducen los límites impuestos al algoritmo genético). Estos intervalos se basan en los límites físicos que dan también sentido a las ecuaciones y al modelo, y se recogen en la Tabla 9. Por ejemplo, un coeficiente de absorción α_a mayor a 1 implicaría “absorber” por parte del material más radiación de la que se recibe, lo cual no es posible. Al igual que un factor de emisividad α_e igual a 1, implicaría que se trata de un cuerpo negro. El coeficiente de convección por su parte es un parámetro que depende de muchos factores como la geometría o superficie, de la velocidad que tenga el fluido en contacto con dicha superficie, etc. y que por tanto puede tomar valores muy arbitrarios depende de la situación física. Debido a ello, en la Tabla 9 se muestra indeterminado este límite, pero a la hora de aplicar el algoritmo genético, se suele imponer un límite superior de 100 en esta primera simulación, y en función del resultado obtenido (el algoritmo genético devolverá $\alpha_c = 100$ o un valor muy cercano si el resultado óptimo de la ecuación (2.11) es un valor superior a este) se cambiarán los límites para este parámetro, permitiendo que sea posible que tome valores mayores a 100 y/o haciendo este intervalo de menor tamaño.

Una vez que se obtienen unos límites más pequeños, en los que se cree que estará el mínimo global de la ecuación (2.11) (puede ser realmente un mínimo local, aunque no es lo normal), se ha solido utilizar una población inicial de 200 individuos y un total de 20 generaciones, ya que con intervalos más pequeños no hace falta que la población inicial del algoritmo sea tan grande y se reduce así la carga computacional (la cual es alta, por

lo que es necesario intentar que sea lo menor posible) de la aplicación del algoritmo genético.

Tabla 9. Límites físicos de los parámetros α_a , α_c y α_e que se estiman con el algoritmo genético, que sirven de guía para imponer unos límites iniciales al algoritmo genético.

	α_a	α_c	α_e
Límite inferior	0	0	0
Límite superior	1	indeterminado	1

Resumidamente, la metodología para encontrar el mínimo de la ecuación (2.11) es un proceso iterativo en el que se realizan varias pruebas modificando los límites de los parámetros que se busca calibrar hasta encontrar el intervalo de valores para cada variable que se cree adecuado, aplicando una última vez el algoritmo y anotando la solución de cada parámetro correspondiente.

2.4 Índices de funcionamiento.

Se estudiarán cuatro índices de funcionamiento, que se aplicarán a los resultados obtenidos una vez se haya calibrado y validado el modelo no lineal y se haya hecho lo mismo con el modelo lineal.

Estos índices se explican a continuación:

- El error absoluto máximo, o E_{max} , el cual representa el valor máximo en valor absoluto de la diferencia de la temperatura de la muestra en el ensayo real menos de la temperatura simulada.
- El error absoluto medio, o E_{med} , el cual representa el valor promedio en valor absoluto de la diferencia de la temperatura de la muestra en el ensayo real, Y_{real} , menos de la temperatura simulada, Y_{sim} , siendo N el número de muestras, t_0 el instante inicial y n cada entrada del vector.

$$E_{med} = \left| \frac{\sum_{i=t_0}^n (Y_{real} - Y_{sim})}{N} \right| \quad (2.12)$$

- La raíz cuadrada del error cuadrático medio, o $RMSE$ (por sus siglas en inglés, *Root Mean Squared Error*), que se calcula mediante la raíz cuadrada de la media aritmética del error cuadrático de la diferencia entre la temperatura de la muestra del ensayo real y la simulada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=t_0}^n (Y_{real} - Y_{sim})^2}{N}} \quad (2.13)$$

- Coeficiente de determinación, o comúnmente conocido como R cuadrado, que se trata de una técnica estadística que mide la correlación de la variable estimada con la real. Se calcula mediante la siguiente fórmula, siendo $SS_{residual}$ el error real (datos del ensayo real menos datos simulados, $Y_{real} - Y_{sim}$) al cuadrado, y SS_{total}

la varianza real, es decir, los datos del ensayo real menos su valor medio ($Y_{real} - \bar{Y}$), al cuadrado también:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}}; \quad (2.14)$$

Siendo:

$$SS_{residual} = \sum_{i=t_0}^n (Y_{real} - Y_{sim})^2$$

$$SS_{total} = \sum_{i=t_0}^n (Y_{real} - \bar{Y})^2$$

Para n entradas del vector estudiado, partiendo del instante inicial t_0 de dicho vector de datos.

2.5 Linealización y obtención del modelo lineal

La ecuación (2.10) representa el modelo no lineal del sistema que se intenta controlar. Para ello, una forma de controlar este sistema es mediante la técnica PID muy usada en la literatura de la automatización y control de procesos, y que para aplicarla es necesario la linealización de dicho modelo. Este apartado trata de dicha linealización, que se desarrolla paso a paso, llegando a una solución final que podrá relacionar la temperatura de salida con las distintas entradas (manipulables o no) del sistema, como son la radiación, la temperatura ambiente y la apertura de la persiana.

El proceso de linealización del modelo pasa por varias fases:

1. Definición de las variables de desviación
2. Linealización de los términos no lineales.
3. Aplicación de la condición de estado estacionario
4. Sustitución, desarrollo y simplificación de la ecuación resultante
5. Aplicación de la transformada de Laplace y simplificación.

Para simplificar, previamente se realiza un cambio de variable para deshacerse de algunas de las constantes de la ecuación (2.10) y así simplificarla:

$$a \cdot I(t) \left(\text{sen } \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{U(t)}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) - b \cdot (T^4(t) - T_a^4(t)) - c \cdot (T(t) - T_a(t)) = \frac{d}{dt} (m_s \cdot c_s \cdot T(t)) \quad (2.15)$$

Siendo:

$$a = \frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_{f(90\%)} \text{sen } \alpha_0} \cdot S_s \cdot \alpha_a; \quad b = \alpha_e \cdot \sigma \cdot S_s; \quad c = \alpha_c \cdot S_s;$$

Una vez simplificada la ecuación, definimos las variables de desviación respecto a un punto de operación cualquiera:

$$\begin{aligned} T(t) &= \tilde{T}(t) + \bar{T}; & T_a(t) &= \tilde{T}_a(t) + \bar{T}_a \\ I(t) &= \tilde{I}(t) + \bar{I}; & U(t) &= \tilde{U}(t) + \bar{U} \end{aligned}$$

Por otro lado, se linealizan los términos no lineales de la ecuación, que se comentaron en el anterior capítulo de este trabajo. A continuación, se muestra dicho desarrollo:

$$T^4(t) \approx 4\bar{T}^3\tilde{T}(t) + \bar{T}^4; \quad (2.16)$$

$$T_a^4(t) \approx 4\bar{T}_a^3\tilde{T}_a(t) + \bar{T}_a^4; \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} I(t) \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{U(t)}{100} \right) \alpha_0 \right] &\approx \bar{I} \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] + \\ + \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \tilde{I}(t) &- \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \cdot \tilde{U}(t); \end{aligned} \quad (2.18)$$

El siguiente paso a seguir es el de aplicar a la ecuación (2.15) la condición de estado estacionario, igualando a cero las derivadas respecto del tiempo y trabajando con las variables de desviación en su forma estacionaria:

$$\begin{aligned} a \cdot \bar{I} \cdot \left(\text{sen} \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) - b \cdot (\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4) - c \cdot (\bar{T} - \bar{T}_a) &= 0 \\ \rightarrow \\ \rightarrow c \cdot (\bar{T} - \bar{T}_a) &= a \cdot \bar{I} \cdot \left(\text{sen} \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) - b \cdot (\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Una vez todos los desarrollos completados, se empieza a sustituir en la ecuación (2.15), empezando por introducir la aproximación de las no linealidades (ecuaciones (2.16), (2.17) y (2.18)) y la separación en variables de desviación, donde $\tilde{T}(t)$ representa el transitorio de la derivada de la temperatura respecto del tiempo:

$$\begin{aligned} a \cdot \text{sen} \alpha_0 \cdot \tilde{I}(t) + a \cdot \bar{I} \cdot \text{sen} \alpha_0 - a \cdot \bar{I} \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] - \\ - a \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \tilde{I}(t) + a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \cdot \tilde{U}(t) - \\ - b \cdot \left(4\bar{T}^3\tilde{T}(t) + \bar{T}^4 - 4\bar{T}_a^3\tilde{T}_a(t) - \bar{T}_a^4 \right) - c \cdot (\bar{T} - \bar{T}_a) - c \cdot (\tilde{T}(t) - \tilde{T}_a(t)) \\ = m_s \cdot c_s \cdot \tilde{T}(t) \end{aligned}$$

Si se incluye ahora la ecuación (2.19):

$$\begin{aligned}
 & a \cdot \text{sen } \alpha_0 \cdot \tilde{I}(t) + a \cdot \bar{I} \cdot \text{sen } \alpha_0 - a \cdot \bar{I} \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] - \\
 & - a \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \tilde{I}(t) + a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \cdot \tilde{U}(t) - \\
 & - b \cdot \left(4\bar{T}^3 \tilde{T}(t) + \bar{T}^4 - 4\bar{T}_a^3 \tilde{T}_a(t) - \bar{T}_a^4 \right) - c \cdot \left(\tilde{T}(t) - \tilde{T}_a(t) \right) - \\
 & - a \cdot \bar{I} \cdot \left(\text{sen } \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) + b \cdot (\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4) = m_s \cdot c_s \cdot \tilde{T}(t)
 \end{aligned}$$

Reagrupando términos comunes:

$$\begin{aligned}
 & \left(a \cdot \text{sen } \alpha_0 - a \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) \cdot \tilde{I}(t) + a \cdot \bar{I} \cdot \text{sen } \alpha_0 - a \cdot \bar{I} \\
 & \quad \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] + \\
 & + a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \cdot \tilde{U}(t) - b\bar{T}^4 + (4b\bar{T}_a^3 + c)\tilde{T}_a(t) + b\bar{T}_a^4 - \\
 & - a \cdot \bar{I} \cdot \text{sen } \alpha_0 + a \cdot \bar{I} \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] + b\bar{T}^4 - b\bar{T}_a^4 = \\
 & = m_s \cdot c_s \cdot \tilde{T}(t) + 4b\bar{T}^3 \tilde{T}(t) + c\tilde{T}(t)
 \end{aligned}$$

De la expresión anterior se puede observar cómo aparecen términos en estado estacionario iguales pero de signo contrario (como los términos $b\bar{T}^4$, $b\bar{T}_a^4$, $a\bar{I}\text{sen } \alpha_0$, ...) con lo que se anulan entre ellos:

$$\begin{aligned}
 & \left(a \cdot \text{sen } \alpha_0 - a \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) \cdot \tilde{I}(t) + a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \cdot \tilde{U}(t) + \\
 & + (4b\bar{T}_a^3 + c)\tilde{T}_a(t) = m_s \cdot c_s \cdot \tilde{T}(t) + 4b\bar{T}^3 \tilde{T}(t) + c\tilde{T}(t)
 \end{aligned}$$

Llegado a este punto, se aplica la transformada de Laplace con condiciones iniciales nulas, donde en la derivada de la temperatura respecto del tiempo aparecerá la variable s :

$$\begin{aligned}
 & \left(a \cdot \text{sen } \alpha_0 - a \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) \cdot I(s) + a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \cdot U(s) + \\
 & + (4b\bar{T}_a^3 + c) \cdot T_a(s) = m_s \cdot c_s \cdot s \cdot T(s) + 4b\bar{T}^3 T(s) + cT(s)
 \end{aligned}$$

Dado que la salida del modelo es la temperatura, se saca factor común y se iguala todo a ella:

$$\left(a \cdot \text{sen } \alpha_0 - a \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right) \cdot I(s) + a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \cdot U(s) +$$

$$+ (4b\bar{T}_a^3 + c) \cdot T_a(s) = (m_s \cdot c_s \cdot s + 4b\bar{T}^3 + c) \cdot T(s)$$

Se obtiene así la expresión siguiente, que relaciona la temperatura (variable de salida del sistema de control) con las demás entradas al sistema (I, U y T_a):

$$T(s) = \frac{\left(a \cdot \text{sen } \alpha_0 - a \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right)}{(m_s \cdot c_s \cdot s + 4b\bar{T}^3 + c)} \cdot I(s) + \frac{a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right]}{(m_s \cdot c_s \cdot s + 4b\bar{T}^3 + c)} \cdot U(s) + \frac{4b\bar{T}_a^3 + c}{(m_s \cdot c_s \cdot s + 4b\bar{T}^3 + c)} T_a(s)$$

Si se normaliza la expresión anterior para obtener la forma de un modelo de primer orden, se llega finalmente a la siguiente ecuación:

$$T(s) = \frac{\left(a \cdot \text{sen } \alpha_0 - a \cdot \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right)}{\left(\frac{m_s c_s}{4b\bar{T}^3 + c} \cdot s + 1 \right)} \cdot I(s) + \frac{a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right]}{\left(\frac{m_s c_s}{4b\bar{T}^3 + c} \cdot s + 1 \right)} \cdot U(s) + \frac{\frac{4b\bar{T}_a^3 + c}{4b\bar{T}^3 + c}}{\left(\frac{m_s c_s}{4b\bar{T}^3 + c} \cdot s + 1 \right)} T_a(s)$$

Considerando que los términos de los numeradores son las ganancias para cada una de las entradas del modelo, y que los términos que acompañan multiplicando a s son sus constantes de tiempo, se tendría finalmente la siguiente ecuación que representa al modelo linealizado del horno solar:

$$T(s) = \frac{k_I}{(\tau s + 1)} \cdot I(s) + \frac{k_U}{(\tau s + 1)} \cdot U(s) + \frac{k_{T_a}}{(\tau s + 1)} T_a(s) \quad (2.20)$$

Donde las igualdades de las ganancias y constantes de tiempo se muestran a continuación, donde se simplifican un poco deshaciendo primero el cambio de variable de a, b y c realizado al principio del capítulo, y empezando por la ganancia k_I :

$$k_I = \frac{a \cdot \left(\text{sen } \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right)}{4b\bar{T}^3 + c}; \rightarrow$$

$$\rightarrow k_I = \frac{\frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_f(90\%) \text{sen } \alpha_0} \cdot S_s \cdot \alpha_a \left(\text{sen } \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right)}{4\alpha_e \cdot \sigma \cdot S_s \bar{T}^3 + \alpha_c \cdot S_s}; \rightarrow$$

$$k_I = \frac{\frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_{f(90\%)}} \cdot \alpha_a \left(\text{sen } \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right)}{4\alpha_e \sigma \bar{T}^3 + \alpha_c} \quad (2.21)$$

A continuación, la ganancia k_U :

$$\begin{aligned} k_U &= a \cdot \frac{\frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right]}{4b\bar{T}^3 + c}; \rightarrow \\ \rightarrow k_U &= \frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_{f(90\%)}} \cdot S_s \alpha_a \cdot \frac{\frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right]}{4\alpha_e \sigma S_s \bar{T}^3 + \alpha_c S_s} \rightarrow \\ k_U &= \frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_{f(90\%)}} \cdot \alpha_a \cdot \frac{\frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right]}{4\alpha_e \sigma \bar{T}^3 + \alpha_c} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Y la ganancia k_{T_a} :

$$\begin{aligned} k_{T_a} &= \frac{4b\bar{T}_a^3 + c}{4b\bar{T}^3 + c}; \rightarrow k_{T_a} = \frac{4\alpha_e \sigma S_s \bar{T}_a^3 + \alpha_c S_s}{4\alpha_e \sigma S_s \bar{T}^3 + \alpha_c S_s}; \rightarrow \\ k_{T_a} &= \frac{4\alpha_e \sigma \bar{T}_a^3 + \alpha_c}{4\alpha_e \sigma \bar{T}^3 + \alpha_c} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Por otra parte, la constante de tiempo quedaría como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{m_s c_s}{4b\bar{T}^3 + c} \rightarrow \\ \tau &= \frac{m_s c_s}{4\alpha_e \sigma S_s \bar{T}^3 + \alpha_c S_s} \end{aligned} \quad (2.24)$$

En resumen, la ecuación (2.20) representa el modelo linealizado, que relaciona la temperatura de salida respecto de la temperatura ambiente, la radiación y la apertura de la persiana. Esta modelización sirve para poder diseñar controladores tipo PID a partir de ella, usando las expresiones de ganancias (ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23)) y de la constante de tiempo (ecuación (2.24)) que finalmente se han obtenido.

De las ecuaciones que definen la ganancia del modelo linealizado para cada entrada al mismo (ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23)) y de la constante de tiempo (ecuación (2.24)), común para todas las funciones de transferencia, se pueden extraer varias interpretaciones:

- Dada la posición en el denominador del valor en estacionario de la temperatura de la muestra de ensayo elevada a la tercera potencia, se puede extraer que, a puntos de operación bajos, la ganancia del modelo será mayor, y por tanto en puntos de operación más altos, la ganancia será menor.
- Al igual que ocurre con la ganancia, sucede con la constante de tiempo: la temperatura de la muestra (su valor en estacionario, que define el punto de operación en el que se trabaja) es inversamente proporcional a la constante de tiempo, por lo que a menor punto de operación (temperaturas de la pieza pequeñas) el modelo tendrá mayor constante de tiempo, es decir, será más lento. En consecuencia, a mayores temperaturas de operación, τ será más pequeña, siendo el modelo entonces más rápido.
- La apertura de la persiana, señal manipulable del sistema, influye en la ganancia del sistema, representada en la ecuación (2.22), de manera que, a mayor valor estacionario de la apertura de la persiana, mayor será dicha ganancia.
- Respecto de la irradiancia solar directa, lo que en este trabajo se denomina simplemente como radiación solar, no influye directamente en la constante de tiempo del modelo, ni tampoco en las ganancias excepto de la ganancia referida a la apertura de la persiana, que es la señal manipulable del modelo presentado. De hecho, la ganancia del sistema k_U mediante la apertura de la persiana depende de forma directamente proporcional con la radiación solar, como se muestra en la ecuación (2.22).
- Al igual que ocurre con la radiación solar, el coeficiente de absorción α_a modula la ganancia del sistema k_U , ya que este parámetro pondera la radiación que es capaz de absorber la muestra de ensayo, siendo este parámetro α_a característico de la muestra de ensayo a tratar. Así, a un mayor coeficiente de absorción, la ganancia será mayor.
- Al contrario que el parámetro α_a , cuya “misión” es la de absorber energía solar, los parámetros α_c y α_e se encargan de liberar energía y así compensar este modelo energético. Tal y como se observa, estos dos últimos parámetros influyen tanto en las ganancias como en la constante de tiempo de forma inversamente proporcional, es decir, que cuánto mayores sean α_c y α_e , característicos de la muestra de ensayo en cuestión, menor ganancia y menor constante de tiempo tendrá el sistema, y viceversa.
- La masa de la muestra de ensayo influye de forma directamente proporcional en la constante de tiempo del sistema, siendo por tanto más lento cuanto mayor masa posea la muestra. Lo mismo ocurre con el calor específico: cuanto mayor sea para la muestra estudiada, mayor constante de tiempo (sistema más lento).
- La temperatura ambiente no influye en la ganancia k_U ni en la constante de tiempo, siendo por tanto independiente de la función de transferencia del modelo linealizado.
- La superficie de la muestra de ensayo, S_s , no influye en la ganancia del modelo linealizado y sí que lo hace en la constante de tiempo de forma inversamente proporcional, siendo la constante de tiempo menor (sistema más rápido) cuanto mayor sea la superficie de la muestra.

Es importante aclarar que las conclusiones recién expuestas son a raíz de las suposiciones y aproximaciones realizadas para la linealización del modelo.

2.6 Diseño de controladores básicos tipo PID

En esta parte del trabajo se plantearán varias opciones de diseño para los controladores puesto que se tendrán en cuenta distintas restricciones, objetivos o consideraciones que se deseen satisfacer en base a cada diseño. Es necesario aclarar que la intención de estos diseños no es la de controlar el modelo en un solo punto de operación, sino la de diseñar una arquitectura de control capaz de controlar en todo el rango de operación del sistema. Para ello se realizarán dos tipos de diseño:

1. El primer diseño, denominado como diseño A, que se estudiará es el de un controlador PI, diseñado por el método de cancelación polo-cero, con el objetivo de conseguir un error en estado estacionario igual a cero ante cambios en la referencia en forma de escalón.
2. El segundo diseño o diseño B se hará con el objetivo de conseguir un error en estado estacionario cero ante cambios en la referencia en forma de rampa, para lo cual se estudiará la posibilidad de un doble PI en serie para tener así la acción de dos integradores, que consiguen dicho error nulo en régimen permanente.

Como se comprobará posteriormente, si al diseño A (diseñado para cambios en la referencia en forma de escalón) se le introduce una rampa en la referencia, el error en estado estacionario que se obtendrá será constante e igual a cierto valor determinado por la K_p elegida. Si el error es pequeño, se puede validar este diseño para controlar para referencias en forma de rampa; sin embargo, pueden existir ciertas aplicaciones del horno solar donde sea necesario que el error ante entrada en rampa sea nulo, y con este tipo de diseño esto nunca se alcanza. Por eso mismo se estudia el diseño B en este trabajo, para conseguir satisfacer esta condición para ciertas aplicaciones del horno solar.

Aclarar que estos diseños se hacen presuponiendo que en los ensayos que se realizan en el horno, normalmente se conoce de antemano cuál va a ser la forma que tendrá el ensayo, ya que el objetivo es normalmente el de llevar a la muestra a una cierta temperatura elevada mediante una rampa (para lo que se usaría el diseño B, para conseguir el error nulo) y, una vez se alcance dicha temperatura, cambiar de controlador al tipo A para mantener el calor en dicho punto durante un tiempo determinado y luego introducir un escalón en la referencia y conseguir ese error de seguimiento nulo también.

Además, es necesario aclarar que se introducirá en todos los casos (como ya se explicará el diseño en los siguientes pasos) un control anticipativo para el rechazo de perturbaciones (en concreto, la radiación solar), ya que los diseños explicados no poseen la capacidad suficiente para responder rápidamente a cambios en la perturbación. Por otra parte, todos los diseños llevarán incorporado el sistema *antiwindup* el cual se explicará también en profundidad en los puntos posteriores, y que ayudará a que el controlador contemple las no linealidades en la entrada del sistema.

2.6.1 Control ante escalón en la referencia

El diseño de controladores se basa en la linealización del modelo que se presentó en la ecuación (2.20) de la sección anterior, puesto que el método de diseño está basado en la cancelación polo-cero, dado que se buscará cancelar el polo del sistema con el cero proporcionado por el controlador PI. Para ello se iguala el término integral del controlador, T_i , con la constante de tiempo del modelo lineal, τ . El diseño del controlador

está basado en el esquema común de control que se muestra a continuación (Figura 2.5) donde se muestra un sistema en bucle cerrado, puesto que para controlar la planta se realimenta la salida de la misma y se calcula el error (diferencia entre la señal de referencia que se busca alcanzar a la salida y la propia salida), siendo éste error la señal de entrada al controlador. El controlador por su parte, en base a la señal de error que recibe, proporcionará una señal de control a la planta (en forma de apertura o cierre de la persiana). Aclarar que, para simplificar, no se ha tenido en cuenta en el diagrama las perturbaciones, como son la radiación solar y la temperatura ambiente, y que se tratarán en el apartado posterior.

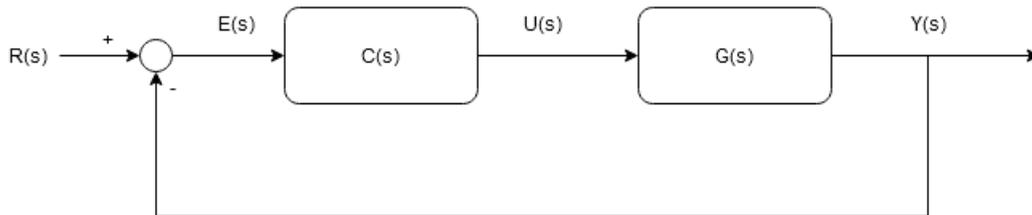


Figura 2.5. Esquema de un sistema en bucle cerrado.

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1}; \quad C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{K_p}{T_i s} (1 + T_i s);$$

La respuesta del sistema en bucle cerrado se puede deducir en base a Figura 2.5, sabiendo que la función de transferencia de la planta es la relación entre la salida de la planta y la entrada a la misma:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{Y(s)}{U(s)} \rightarrow Y(s) = G(s)U(s) \rightarrow Y(s) = G(s)U(s) \rightarrow \\ \rightarrow Y(s) &= E(s)C(s)G(s) \rightarrow Y(s) = (R(s) - Y(s))C(s)G(s) \rightarrow \\ Y(s) &= R(s)C(s)G(s) - Y(s)C(s)G(s) \end{aligned}$$

Sabiendo que $G_{bc} = Y(s)/R(s)$, se ordena el desarrollo anterior hasta conseguir en un lado de la igualdad el término de la derecha de la definición de G_{bc} :

$$\begin{aligned} Y(s) + Y(s)C(s)G(s) &= R(s)C(s)G(s) \rightarrow Y(s)(1 + C(s)G(s)) = R(s)C(s)G(s) \rightarrow \\ \frac{Y(s)}{R(s)} &= \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \rightarrow G_{bc} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}; \end{aligned}$$

Una vez que se conoce la dinámica del sistema en bucle cerrado, se desarrolla la anterior dicha ecuación y se imponen las condiciones de diseño, estableciendo primero que el término integral sea igual a la constante de tiempo del modelo lineal, $T_i = \tau$, consiguiendo así la cancelación polo-cero:

$$G_{bc} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{\frac{K_p}{T_i s} (1 + T_i s) \cdot \frac{k}{\tau s + 1}}{1 + \frac{K_p}{T_i s} (1 + T_i s) \cdot \frac{k}{\tau s + 1}} \rightarrow T_i = \tau \rightarrow$$

$$G_{bc} = \frac{\frac{K_p k}{T_i s}}{\frac{T_i s + K_p k}{T_i s}} = \frac{K_p k}{T_i s + K_p k} = \frac{1}{\frac{T_i}{K_p k} s + 1}$$

El término que acompaña a la variable s es la constante de tiempo en bucle cerrado del sistema, y en función de la especificación que se le imponga a ésta, se obtendrá el valor de la constante proporcional del controlador:

$$\tau_{bc} = \frac{T_i}{K_p k} \rightarrow K_p = \frac{T_i}{\tau_{bc} k}$$

Para terminar de diseñar el controlador, es decir, tener un valor de la constante proporcional, se impone una especificación a la constante de tiempo en bucle cerrado; dado que el objetivo será controlar la planta en todo su rango de operación (ante escalones en la referencia), siendo ésta muy no lineal, se decide que para conseguir un buen comportamiento en el bucle cerrado se impondrá al modelo que tenga una constante de tiempo en bucle cerrado fija para todo su rango de operación: que la constante de tiempo en bucle cerrado sea la media de las constantes de tiempo de los modelos lineales obtenidos, ya que es la solución más conservadora dado que si se imponen condiciones más agresivas (dado el tipo de esquema que se va implementar, con conmutaciones entre controladores con rangos de operación muy desiguales) se obtendrán dinámicas no deseadas en la salida que no compensan la velocidad impuesta al sistema en bucle cerrado.

En la parte de resultados se estudiará las especificaciones aquí descritas. Además, en los resultados este controlador PI irá acompañado de un controlador anticipativo o *feedforward* que asegure el rechazo ante perturbaciones más el sistema *antiwindup* para lidiar con las no linealidades a la entrada del modelo no lineal.

2.6.2 Control ante rampa en la referencia

Para conseguir un error ante rampa nulo, será necesario que el sistema en lazo cerrado posea dos integradores [16]. Por ello, el diseño preferido para conseguir el error nulo ante rampa será añadir otro PI en serie respecto del esquema anterior, es decir, dos controladores PI seguidos. Para ello se diseña, al igual que antes, utilizando la técnica de cancelación polo-cero cancelando uno de los ceros del controlador con el polo del sistema. El otro polo del controlador será escogido en función del lugar de las raíces del sistema, buscando obtener dos polos reales iguales en bucle cerrado ya que sería lo mínimo para obtener una respuesta sobreamortiguada (no será así exactamente dado que se quedará un cero en el numerador). Los dos controladores PI serían de la forma que se muestra a continuación (puede interpretarse también como un PID interactivo con un integrador adicional):

$$C(s) = \frac{K_p (T_i s + 1)(T_d s + 1)}{s^2};$$

A continuación se desarrolla el producto del controlador con la función de transferencia, imponiendo que $T_i = \tau$:

$$L(s) = \frac{K_p(T_i s + 1)(T_d s + 1)}{s^2} \cdot \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{K_p k (T_i s + 1)}{s^2};$$

Dado que la expresión de $G_{bc}(s)$ se puede obtener como sigue:

$$G_{bc} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{\frac{K_p k (T_i s + 1)}{s^2}}{1 + \frac{K_p k (T_i s + 1)}{s^2}} = \frac{K_p k (T_d s + 1)}{s^2 + K_p k T_d s + K_p k}$$

Se llega a la conclusión de que el sistema en bucle cerrado tendrá una dinámica de segundo orden, con un cero en el numerador. Por tanto, para la expresión anterior de $L(s)$, se analizará en el lugar de las raíces la respuesta y se impondrá que en bucle cerrado posea dos polos reales e iguales, es decir, se buscará el punto de corte del lugar de las raíces con el eje real. Así, se tendrá un denominador típico de una función de transferencia de segundo orden tipo:

$$G_{2^{ord}} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

El lugar de las raíces de $L(s) = C(s)G(s)$ (ya realizada la cancelación de un polo con un cero) se muestra en la Figura 2.6. En base a dicho lugar de las raíces, una posible elección de la ganancia es la que da lugar a dos polos reales iguales. El cero del bucle abierto aparecerá como un cero dominante en bucle cerrado, que ayudará a acelerar la respuesta de seguimiento a rampa, no requiriendo de la introducción de un filtro en la referencia que lo cancele.

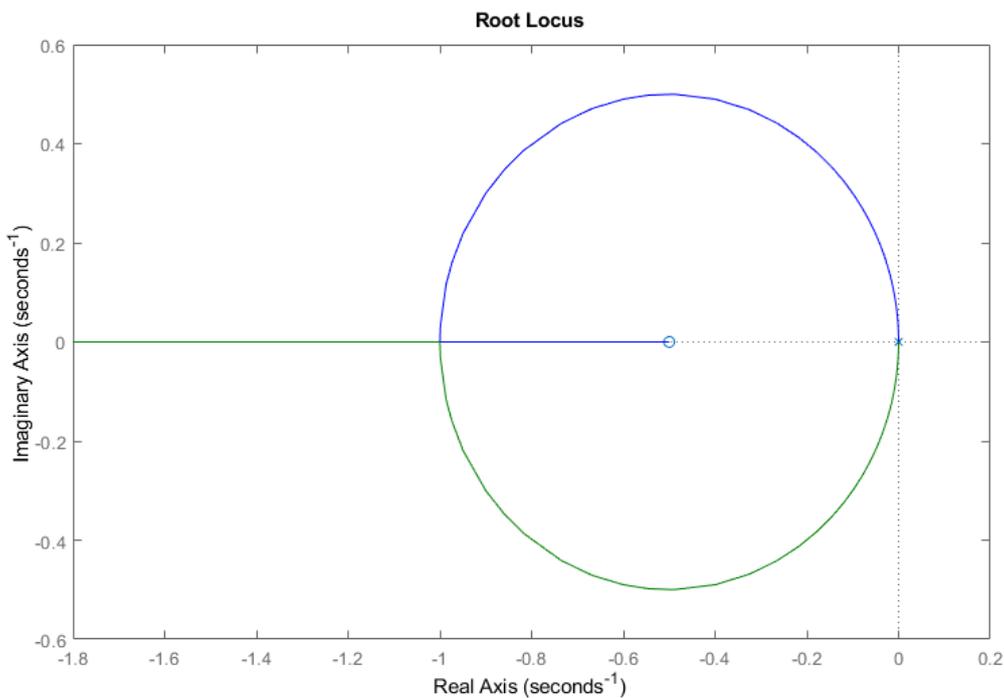


Figura 2.6. Lugar de las raíces típico de un sistema de segundo orden.

Por tanto, dado que el sistema será críticamente amortiguado, entonces se dará que $\zeta = 1$, e igualando los términos del denominador de la expresión de $G_{bc}(s)$ con la expresión de $G_{2^{\circ}ord}$, se obtienen las siguientes igualdades:

$$K_p k = \omega_n^2 \rightarrow K_p = \frac{\omega_n^2}{k};$$

$$K_p k T_d = 2\omega_n \rightarrow T_d = \frac{2 \cdot \omega_n}{\omega_n^2} \rightarrow T_d = \frac{2}{\omega_n};$$

Por tanto, imponiendo un valor de ω_n en la función de transferencia en bucle cerrado, se podrá modular el ancho de banda del bucle cerrado. Una posible elección es escoger $\omega_n = 10/\tau$, siendo τ una de las constantes de tiempo de los modelos linealizados escogidos (si se escoge la menor, se obtendrá una respuesta más rápida en bucle cerrado y viceversa, si se escoge la mayor, el ancho de banda del bucle cerrado será menor).

2.7 Tratamiento de las restricciones con el método *antiwindup*

Con el objetivo de que el controlador tenga en cuenta las no linealidades que presenta el horno solar y que vienen implementadas en SIMULINK de forma externa al modelo (ver Figura 2.3), se introduce la técnica conocida como *antiwindup*. Esta técnica se basa en calcular en cada instante de simulación la diferencia entre la salida del controlador (entrada a las no linealidades) y la entrada a la planta (correspondiente a la salida de las 3 no linealidades en serie, modeladas como en la Figura 2.3), tal y como se muestra en la Figura 2.7, donde el bloque de color verde simboliza en este caso la no linealidad compuesta por la velocidad de apertura (del 5 %/s), el cuantizador (posiciones del encoder del motor) y la saturación (del 0 al 100 %), como se mostró anteriormente en la Figura 2.3.

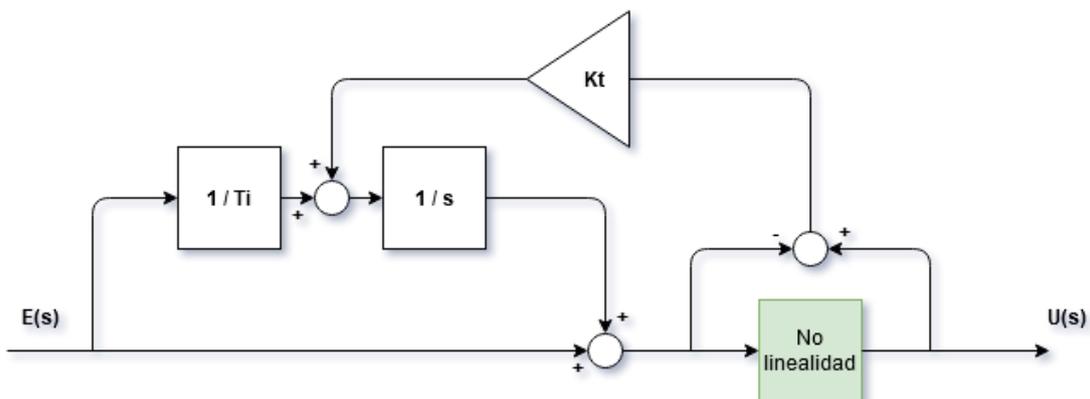


Figura 2.7. Esquema general antiwindup (considerando solo como controlador una acción integral).

Con el anterior esquema se consigue que el controlador atenúa su salida cuando existen diferencias entre la entrada a la no linealidad y la salida de la misma.

2.8 Control anticipativo

Al mismo tiempo que se implementarán los controladores, se implementará también el control anticipativo, o en inglés, *feedforward*, que es vital para este trabajo puesto que se trata de un sistema que depende muy fuertemente de la radiación solar, una señal que no es manipulable y que sus variaciones provocarán comportamientos no deseados en la salida del modelo. Por otra parte, la temperatura ambiente no se tiene en cuenta a la hora del rechazo de perturbaciones ya que su influencia en el modelo es muy pequeña debido a que los cambios que se producen en esta variable se comparan siempre con la temperatura de la muestra de ensayo, que alcanza valores realmente altos en comparación con esta variable.

La manera de implementar este controlador anticipativo está basada en la misma teoría que en la del control por realimentación, donde se utilizaron los parámetros característicos de un modelo lineal de primer orden que se obtienen de la linealización del modelo del horno solar. En este caso, el objetivo es utilizar la dinámica que posee la temperatura de la muestra de ensayo respecto de variaciones de la radiación, obtenida también de la linealización del modelo, en la ecuación (2.20):

$$G_D(s) = \frac{k_I}{\tau s + 1}$$

Nótese que la constante de tiempo es la misma que la de la función de transferencia del modelo lineal respecto de la señal manipulable, la apertura de la persiana; esto facilitará como se verá a continuación los cálculos.

Si se tiene en cuenta la radiación en un sistema de lazo cerrado como el de la Figura 2.5, se obtiene el diagrama mostrado en la Figura 2.8, donde se ha nombrado como $G_D(s)$ a la función de transferencia de la radiación solar (el subíndice “D” proviene del inglés, *disturbance*), y como $Y_D(s)$ la salida de dicha función de transferencia que se suma a la salida $Y_U(s)$ (que corresponde a la salida de la función de transferencia $G(s)$, que relaciona la apertura de la persiana con la temperatura de la muestra). Por su parte, la señal $D(s)$ representa la perturbación en sí misma.

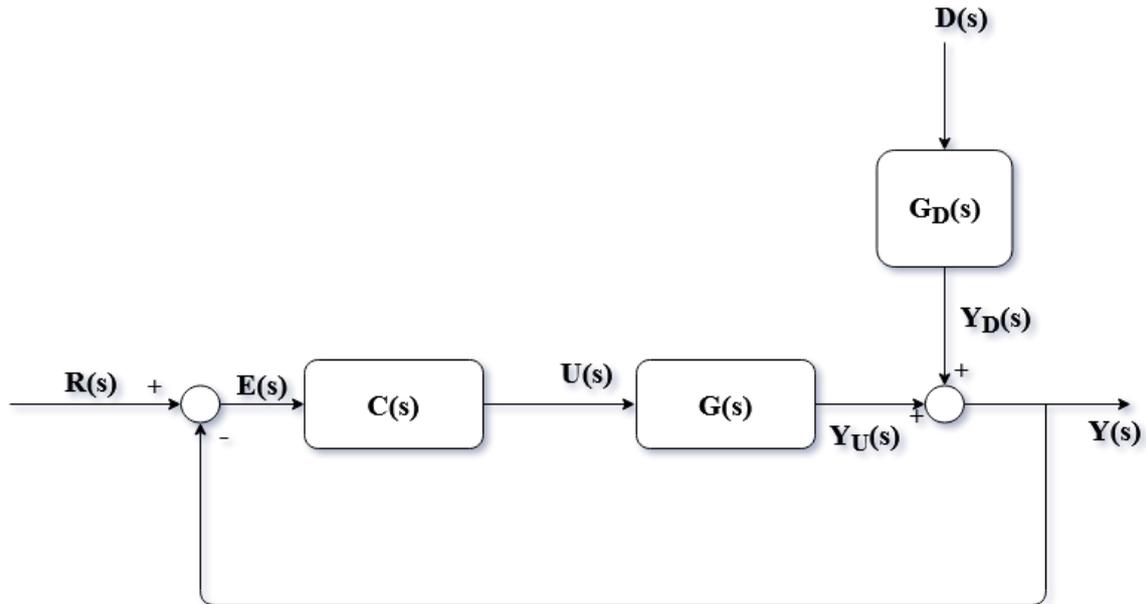


Figura 2.8. Esquema de un sistema en bucle cerrado teniendo en cuenta la radiación.

Si al igual que se hizo para el control por realimentación, se desarrolla la expresión anterior, se puede saber la influencia de la perturbación (la radiación solar) en el lazo cerrado:

$$\begin{aligned}
 Y(s) &= G(s)U(s) + G_D(s)D(s) \rightarrow Y(s) = E(s)C(s)G(s) + G_D(s)D(s) \rightarrow \\
 &\rightarrow Y(s) = (R(s) - Y(s))C(s)G(s) + G_D(s)D(s) \rightarrow \\
 Y(s) &= R(s)C(s)G(s) - Y(s)C(s)G(s) + G_D(s)D(s)
 \end{aligned}$$

Sabiendo que $G_{bc} = Y(s)/R(s)$, se ordena el desarrollo anterior hasta conseguir en un lado de la igualdad el término de la derecha de la definición de G_{bc} :

$$\begin{aligned}
 Y(s) + Y(s)C(s)G(s) &= R(s)C(s)G(s) + G_D(s)D(s) \rightarrow \\
 \rightarrow Y(s)(1 + C(s)G(s)) &= R(s)C(s)G(s) + G_D(s)D(s) \rightarrow \\
 Y(s) &= \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}R(s) + \frac{G_D(s)}{1 + C(s)G(s)}D(s)
 \end{aligned}$$

Tal y como se observa del anterior análisis, el primer término de la expresión obtenida hace referencia al lazo cerrado debido al control por realimentación (como se vio en la parte de diseño de controladores de realimentación), mientras que la segunda expresión se refiere al efecto de la perturbación (en este caso, la radiación), que influye en la salida del modelo de forma independiente. La contribución en la salida de temperatura de la muestra de ensayo debido a la radiación es la siguiente (corresponde al segundo término a la derecha del igual de la expresión anterior):

$$Y(s) = \frac{G_D(s)}{1 + C(s)G(s)}D(s)$$

Para cancelar el efecto de la perturbación, se hace uso del siguiente esquema mostrado en la Figura 2.9 donde la salida de la función de transferencia de la radiación $G_D(s)$ (que se conoce su modelo obtenido de la linealización del modelo no lineal del horno, de la ecuación (2.20)) se introduce al FF o controlador por adelantado (del inglés, *feedforward*) y esta salida se resta a la salida del controlador adelantándose así a los cambios que se producen en la radiación solar, puesto que la diferencia obtenida es lo que se introduce a la planta.

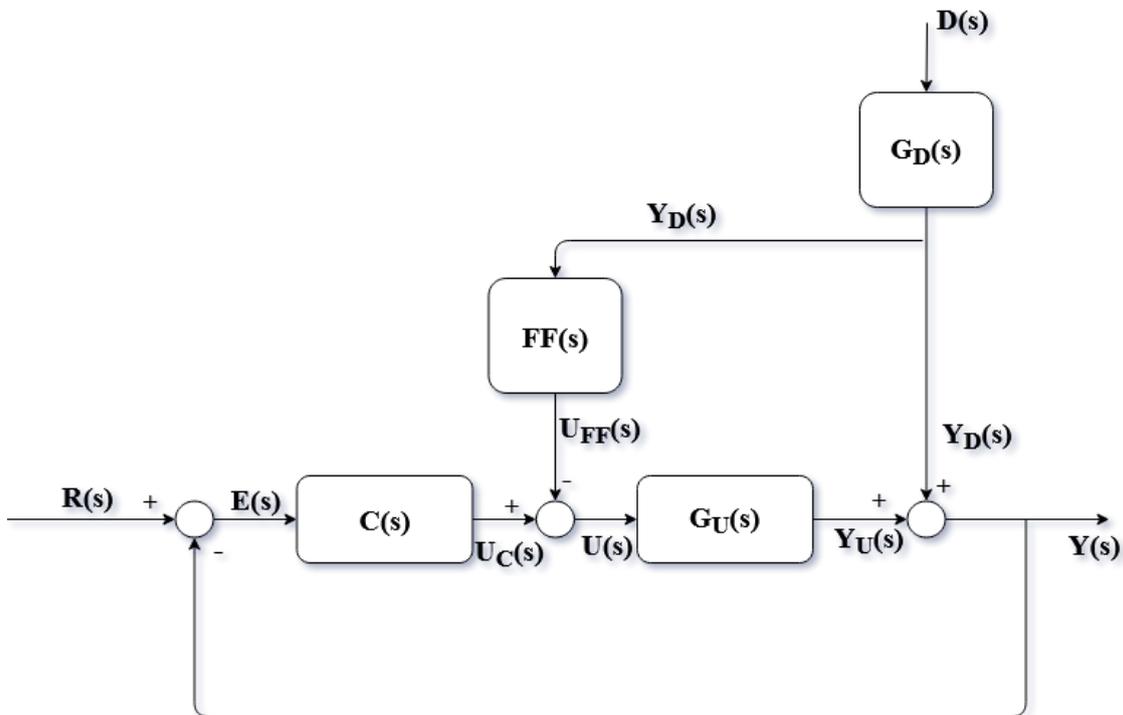


Figura 2.9. Esquema de un sistema en bucle cerrado teniendo en cuenta la radiación y el controlador anticipativo.

Dado que la salida del modelo de la perturbación, sin el controlador por adelantado, tenía la siguiente forma (tras estudiar el esquema mostrado en la Figura 2.8):

$$Y_D(s) = \frac{G_D(s)}{1 + C(s)G(s)} D(s)$$

Ahora, tras añadir el controlador por adelantado, la salida de dicha función de transferencia se verá compensada en lazo cerrado con la contribución del controlador por adelantado diseñado, $FF(s)$:

$$Y_D(s) = \frac{G_D(s)D(s) - G(s)FF(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

Para cancelar el efecto de la perturbación, la idea es conseguir que el numerador de la anterior ecuación que explica teóricamente la influencia de la perturbación en la salida del modelo, por lo que sí se obtiene finalmente el diseño del *feedforward* o controlador por adelantado que se restará a la salida del controlador:

$$FF(s) = \frac{G_D(s)}{G(s)}$$

Además, dado que tanto el modelo de la temperatura respecto de la radiación como el modelo de la temperatura respecto de la apertura de la persiana poseen la misma constante de tiempo (ver (2.21) y (2.22)), el controlador FF será simplemente el cociente entre ambas ganancias, tal y como se muestra a continuación:

$$FF(s) = \frac{k_I}{k_U}; \quad (2.25)$$

Esta última expresión mostrada en la ecuación (2.25) será la que se utilice para conseguir un adecuado rechazo de las perturbaciones.

3 Resultados y discusión

3.1 Calibración y validación del modelo no lineal

Tal y como se explicó en el capítulo 2 de este trabajo, se ha calibrado el modelo para cuatro tipos de muestras distintas. A continuación, se muestran los resultados de aplicar el algoritmo genético para encontrar un valor de α_a , α_c y α_e adecuado para cada material.

A la hora de escoger datos para calibrar, se ha tenido en cuenta la calidad de los datos a tratar: por ejemplo, en algunos datos de los ensayos reales estudiados hay cortes durante la operación, por lo que era necesario dividir ese conjunto de datos igualmente; o también había partes de los ensayos que no correspondían a la dinámica de la muestra tratada. Además, es necesario aclarar que los datos de los ensayos elegidos como datos de calibración han sido seleccionados conforme a un criterio básico, que es el de que dichos datos de calibración cubran el mayor rango de operación posible. Teóricamente, de esta forma la estimación de los parámetros en el proceso de calibración será más efectiva, ya que en la estimación de los parámetros se ha tenido en cuenta todo el rango de operación posible.

Por último, en la Tabla 10 se recogen los parámetros de cada pieza que deben ser introducidos en el modelo no lineal en función de la muestra con la que se trabaje. Además, tal y como se explicará más adelante, en el caso del material de zirconia, la mayoría de los parámetros han tenido que ser buscados, calculados o deducidos puesto que no se disponía de dicha información en los antiguos datos de los ensayos que se utilizan en este trabajo. Otro aspecto importante y que se comentará en concreto con cada pieza es que se ha introducido en el modelo no lineal la variabilidad que representa el calor específico con la temperatura de la muestra de ensayo. Esta variabilidad se implementa en forma de tabla temperatura-calor específico, siendo la entrada la temperatura que hay en cada instante de simulación, y la salida el calor específico que corresponde según la tabla dada, cuyo valor se interpolará automáticamente de la misma.

Tabla 10. Parámetros característicos de cada muestra utilizada en los ensayos que se introducen en el modelo.

	Acero A316-L	Zirconia blanca	Cobre	Carburo de silicio
m_s [kg]	0.1	0.2	0.4143	$3.33 \cdot 10^{-3}$
c_s (a 25°C) [J/(kg·K)]	502	669	352	667
S_s [m ²]	0.01	0.0785	$6.4 \cdot 10^{-3}$	$7.0686 \cdot 10^{-4}$

Los datos y gráficas que se obtengan de calibrar o validar las distintas muestras, se mostrarán en base a la hora local en formato decimal del ensayo.

3.1.1 Acero A316-L

Antes de proceder a calibrar el modelo, se muestra la dependencia que posee el material de la muestra de acero A316-L, respecto de la temperatura del material con el calor específico, ya que este parámetro realmente no es fijo (como ya se apuntó en la Tabla 10, donde se especifica que el valor mostrado en ella es para una temperatura de 25 °C) sino

variable respecto a la temperatura del material. A continuación, se muestra a continuación en la Tabla 11 dicha dependencia del calor específico con la temperatura [7].

Tabla 11. Dependencia del calor específico con la temperatura para la muestra de acero A316L.

Temperatura de la muestra de acero A316L (°C)	Calor específico (J/(Kg·K))
200	514
400	526
600	538
800	562
900	599
1000	611

Para la calibración del modelo no lineal para este material, se cuenta con dos días de ensayos distintos, que datan del 21 y del 24 de febrero de 1997.

A continuación (ver Tabla 12) se muestra cómo se han clasificados los datos de los distintos días de ensayo que se realizaron en el horno con la pieza de acero A316-L. Se ha seguido esta estrategia conforme a un criterio principal, que es el de utilizar para calibrar los datos de ensayo que cubrieron un mayor rango de operación del sistema. Se han utilizado por tanto dos ensayos para calibrar el modelo (uno de ellos dividido en dos partes) y otros dos ensayos distintos para validarlo (estando uno de ellos también dividido en dos partes).

Tabla 12. Clasificación de los datos del acero A316-L en calibración o validación.

Datos de la pieza de ensayo	Uso de los datos
21 de febrero de 1997	Validación
24 de febrero de 1997	Calibración
25 de febrero de 1997	Calibración
06 de marzo de 1997	Validación

Una vez establecido el criterio a la hora de clasificar los datos, se ha calibrado el modelo para los distintos días designados. Por lo general, se ha escogido una población inicial de 200 individuos, y un total de 20 generaciones, ya que experimentalmente se ha comprobado durante la realización de este trabajo que con esa población inicial y ese número de generaciones el algoritmo genético es capaz de alcanzar un óptimo en la calibración del modelo, puesto que en las últimas generaciones se estabiliza el valor de salida de la función objetivo (ver ecuación (2.11)) y sin introducir una carga computacional demasiado larga. Sin embargo, esta afirmación es válida según el intervalo de búsqueda que se les dé a los parámetros, puesto que, si el intervalo es muy grande, entonces hará falta un número más grande de generaciones y de población inicial, y si los intervalos son muy pequeños quizás no haga falta tanta población inicial y con menos generaciones se llegue a buenos resultados. Al final, esto también depende de la propia experiencia y familiarización del usuario con el algoritmo. Además, los intervalos escogidos para esta pieza están basados en expectativas de los valores de los parámetros que se estima que tiene el material (en este caso, el acero A316-L) según fuentes

bibliográficas [17]. Sin embargo, estos valores no serán exactamente estos sino cercanos a ellos debido a la incertidumbre del propio modelo, que será absorbida por los parámetros estimados por el genético para conseguir una solución óptima. Por tanto, primero se aplica el algoritmo con una población inicial de 1000 individuos, 20 generaciones y unos intervalos genéticos en función de los límites físicos de los propios parámetros (establecidos en la Tabla 9).

En primer lugar, se ha empezado con los datos del 24 de febrero de 1997, en donde se probó [5] un controlador PI adaptativo con un control por adelanto, o, en inglés, *feedforward*. En este ensayo, un último intervalo ha sido eliminado debido a que poseía una dinámica distinta a la de la muestra estudiada, además de que había un corte en la operación del horno. Por tanto, del día 24 de febrero sólo se ha utilizado para calibrar el modelo no lineal una parte de los datos que se considera más que suficiente ya que comprende una buena parte del rango de operación de la muestra de ensayo.

Finalmente, en la Figura 3.1 y en la Figura 3.2 se muestra el resultado de aplicar el algoritmo genético para dicho día de ensayo, donde el algoritmo genético proporciona un resultado para los parámetros calibrados (sin incluir sus unidades, que están definidas en la lista de variables) de:

$$\alpha_a = 0.63631; \alpha_c = 57.77622; \alpha_e = 1.18304$$

Y un valor resultante de la función objetivo (ecuación (2.11)) de 437.95.

Tal y como se observa, el valor de la emisividad α_e es superior a 1, lo cual refleja que estos parámetros han perdido sentido físico debido a que han “absorbido” la incertidumbre del modelo para ajustarse de forma óptima (en lo posible) al ensayo real.

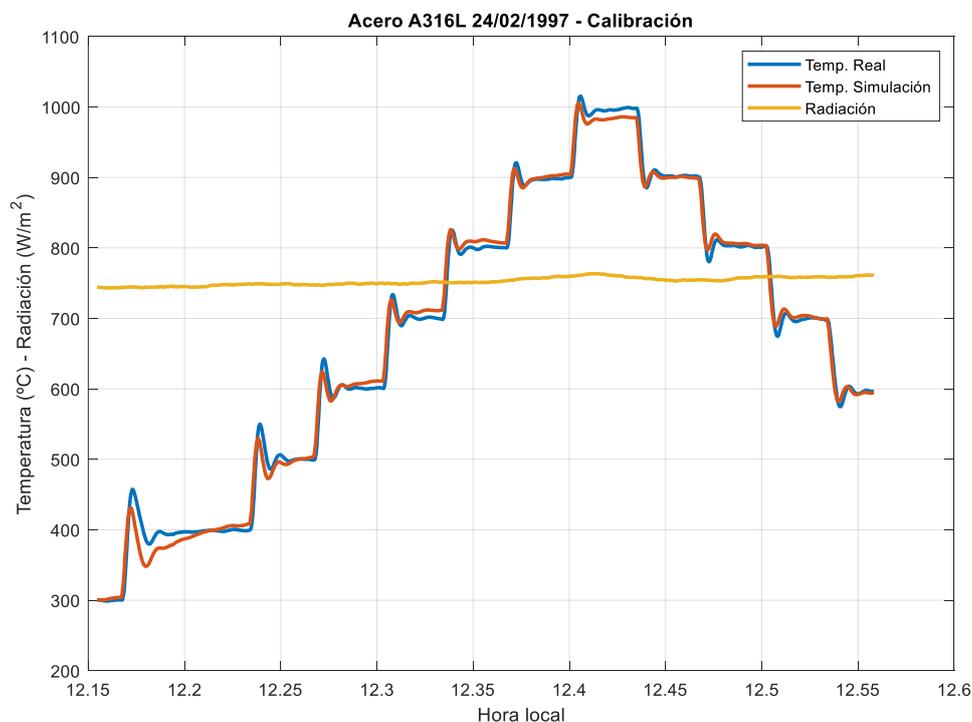


Figura 3.1. Calibración muestra de acero A316-L con el ensayo del día 24/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.

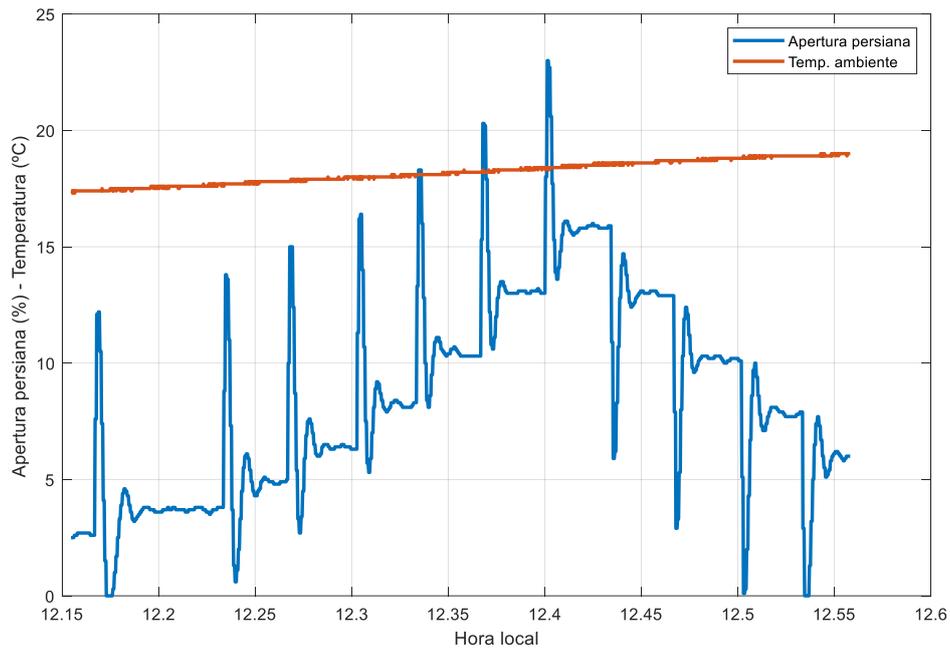


Figura 3.2. Calibración muestra de acero A316-L con el ensayo del día 24/02/1997. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

A continuación (Figura 3.3 y Figura 3.4) se muestran los resultados de calibrar el modelo con los datos del ensayo del día 25 de febrero de 1997. En este ensayo, no se dispone del dato de la temperatura ambiente, por lo que se ha supuesto que es de 20 °C en base a los datos del ensayo del día 24 de febrero de 1997 (un día antes del utilizado) puesto que en dichos datos la temperatura tiende hacia ese valor sobre las 12 y media de hora local, mientras que el ensayo del día 25 transcurre sobre las 15 horas locales. Por tanto, se considera 20 °C un valor asumible, pese a la incertidumbre que introduce al modelo.

Es necesario aclarar, en base al criterio explicado anteriormente para elegir datos de calibración, que este ensayo del día 25 de febrero como el anterior del día 24, son muy válidos para la calibración ya que comprenden una buena parte del rango de operación de la muestra.

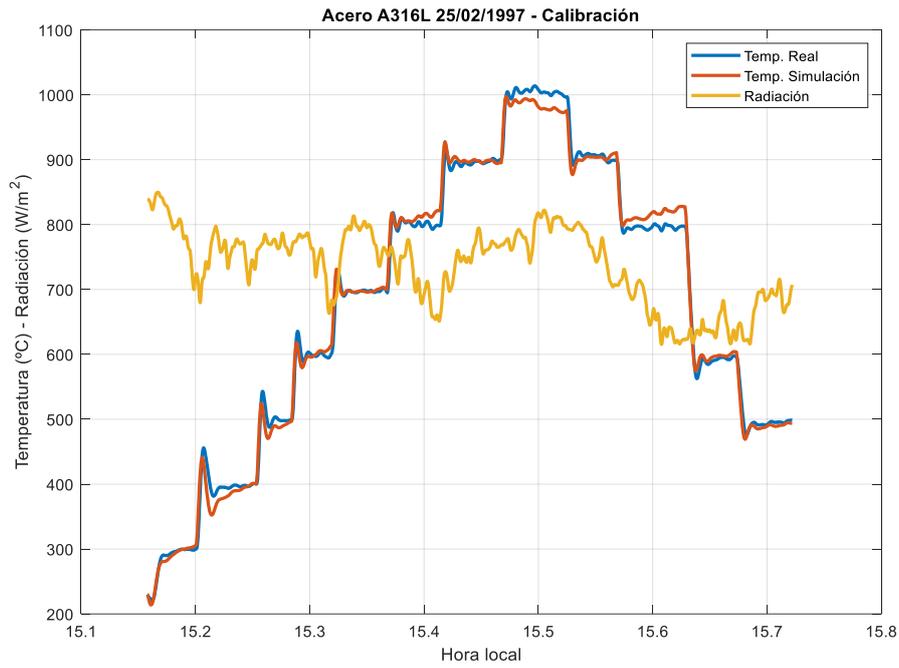


Figura 3.3. Calibración completa de la muestra de acero A316-L, ensayo del día 25/02/1997. Temperatura simulada, temperatura real y radiación solar.

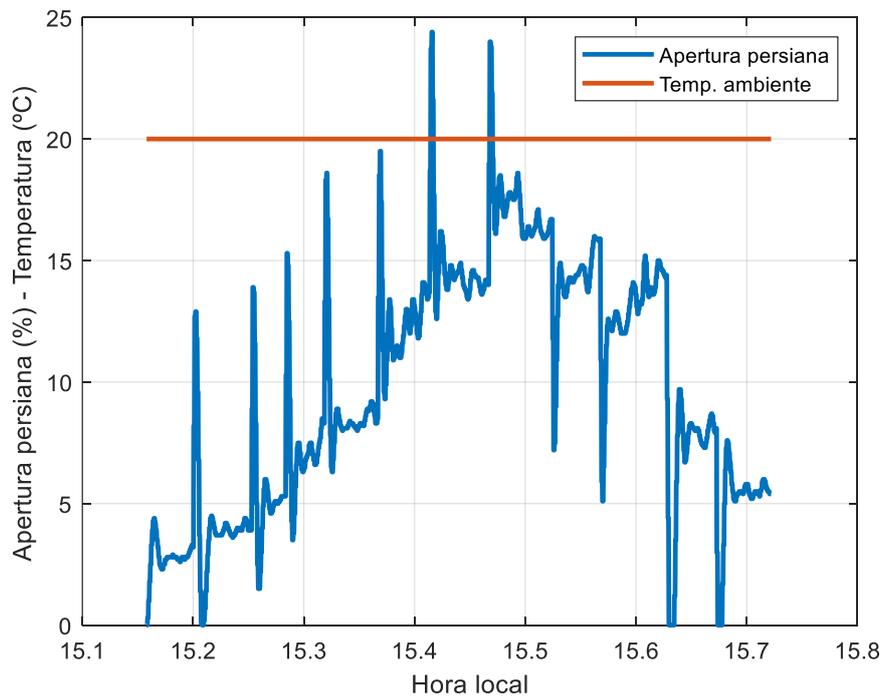


Figura 3.4. Calibración completa muestra de acero A316-L, ensayo del día 25/02/1997. Apertura persiana y temperatura ambiente.

Los parámetros que se obtienen de dicha simulación son $\alpha_a = 0.58991$, $\alpha_c = 59.10775$ y $\alpha_e = 1.21155$, con un valor de la función objetivo de 657.32.

Es notorio destacar que los valores que obtienen los parámetros estimados tanto en este ensayo como en los posteriores e incluso con distintos materiales, pueden no ser fiables,

ya que el algoritmo genético busca los mejores valores para el modelo dado, lo cual implica que estos parámetros de alguna manera “absorben” la incertidumbre o errores del modelado intentando compensarlo y obteniendo una señal lo más adecuada posible. Además, no existe garantía de que el algoritmo haya alcanzado un óptimo global, pudiendo ser resultados subóptimos muy influenciados por el rango inicial de búsqueda del valor de los parámetros.

Finalmente, la Tabla 13 resume el resultado de los parámetros aplicados tras aplicar el algoritmo genético, para así finalmente en la última fila de la tabla calcular el valor medio de dichos parámetros, que se utilizarán posteriormente para validar el modelo no lineal para la muestra de ensayo estudiada. Como se puede observar, los valores obtenidos en la calibración en los dos ensayos se acercan mucho, pese a que si se comparan ambas simulaciones existe una diferencia notable: el ensayo del día 24/02/1997 (ver Figura 3.1 y Figura 3.2) la radiación solar se presenta muy estable, en torno a los 750 W/m², lo cual puede indicar que durante el ensayo el cielo estuvo despejado; sin embargo en el ensayo del día 25 la radiación se presenta muy variable, lo cual indica probablemente que hubo presencia de nubes. Aún así, los valores de los parámetros estimados son muy parecidos entre ambos ensayos, por lo que parece indicar que la calibración alcanzada para el modelo no lineal es buena, y por tanto, esos valores medios funcionarán bastante bien pues la diferencia del valor medio calculado al valor que devuelve el algoritmo genético es muy pequeña. Por tanto, dado que los parámetros medios son bastante cercanos los directamente estimados, se ha preferido no validar sobre los mismos datos de calibración de nuevo y empezar directamente las validaciones con los datos de ensayo designados para ello en la Tabla 12.

Tabla 13. Parámetros obtenidos durante la calibración para el material de acero A316-L.

Datos para calibración	α_a	α_c	α_e
24/02/1997	0.60180	54.7937	1.07832
25/02/1997	0.58991	59.1078	1.21155
Valor medio:	0.595855	56.95075	1.144935

A continuación, se muestran los resultados de validar el modelo con los datos del ensayo del día 21 de febrero de 1997, los cuales han sido esta vez divididos en dos partes, con el objetivo también de eliminar un intervalo de los datos que no corresponde con la dinámica real de la pieza. La primera parte de la simulación del día 21 de febrero de 1997 corresponde a una de las validaciones del modelo (ver Figura 3.5 y Figura 3.6), mientras que la Figura 3.7 y la Figura 3.8 corresponden con la segunda parte de los datos del día 21 de febrero de 1997.

Se puede observar como en la validación de la ambas partes del día 21 de febrero de 1997 la salida del modelo no lineal simulada se ajusta de igual forma a salida real de dicho día; además, todo ello pese a la diferencia que hay respecto a la radiación entre ambos ensayos, donde en la primera parte de los datos la radiación es prácticamente constante (ver Figura 3.5), mientras que en la segunda parte ésta sufre variaciones (ver Figura 3.6) provocadas probablemente por la presencia de nubes.

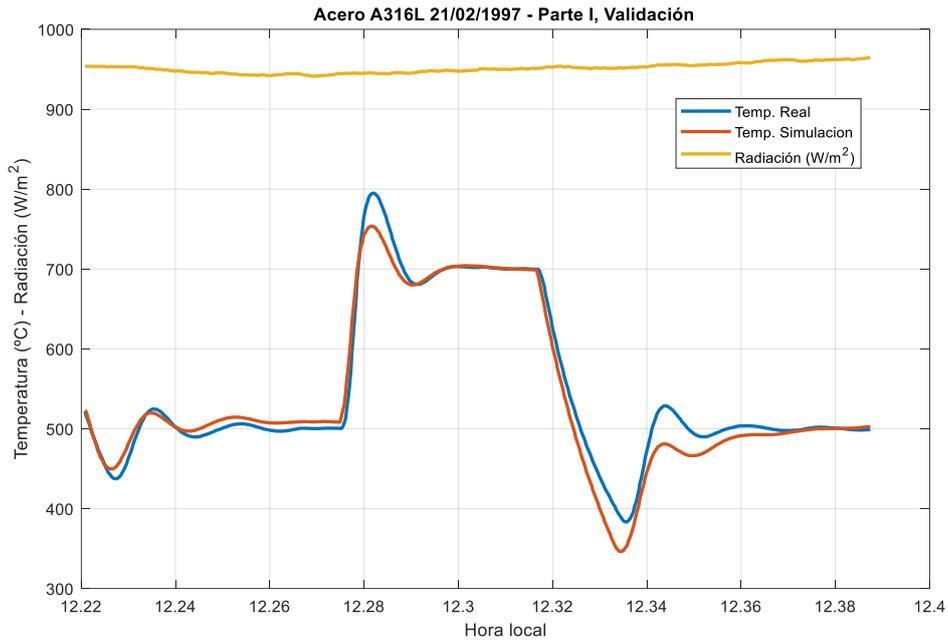


Figura 3.5. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 21/02/1997, parte I. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.

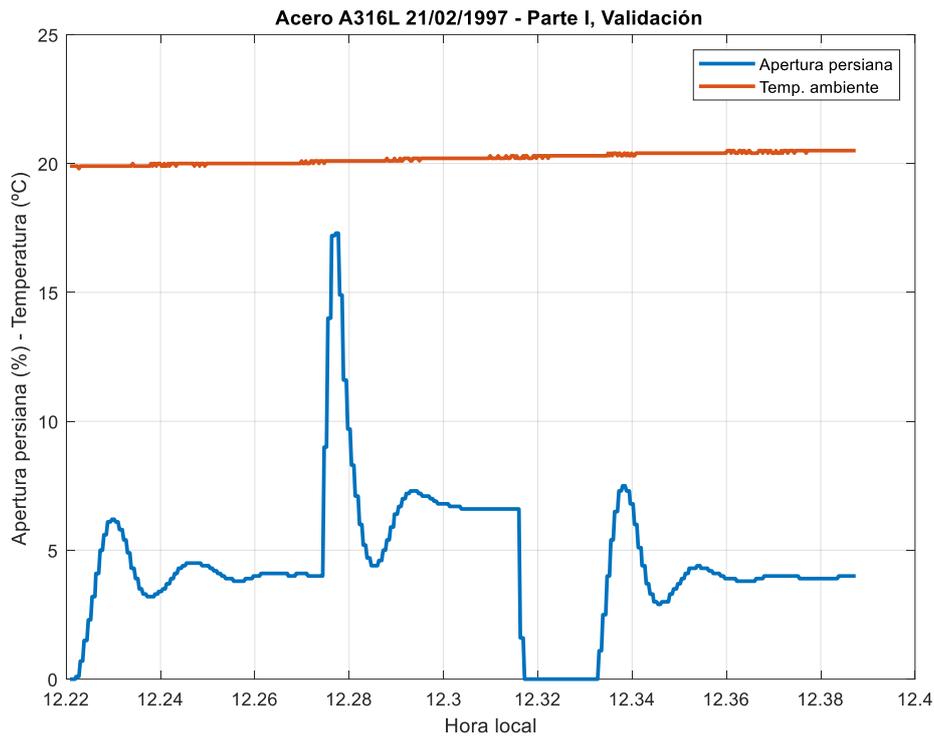


Figura 3.6. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 21/02/1997, parte I. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

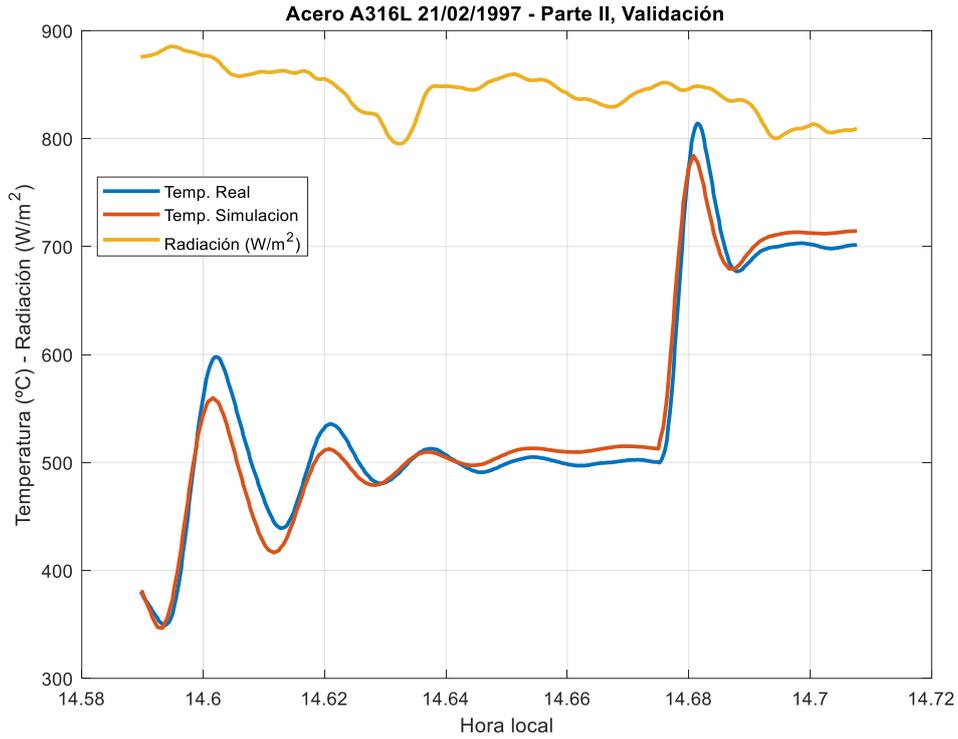


Figura 3.7. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 21/02/1997, parte II. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.

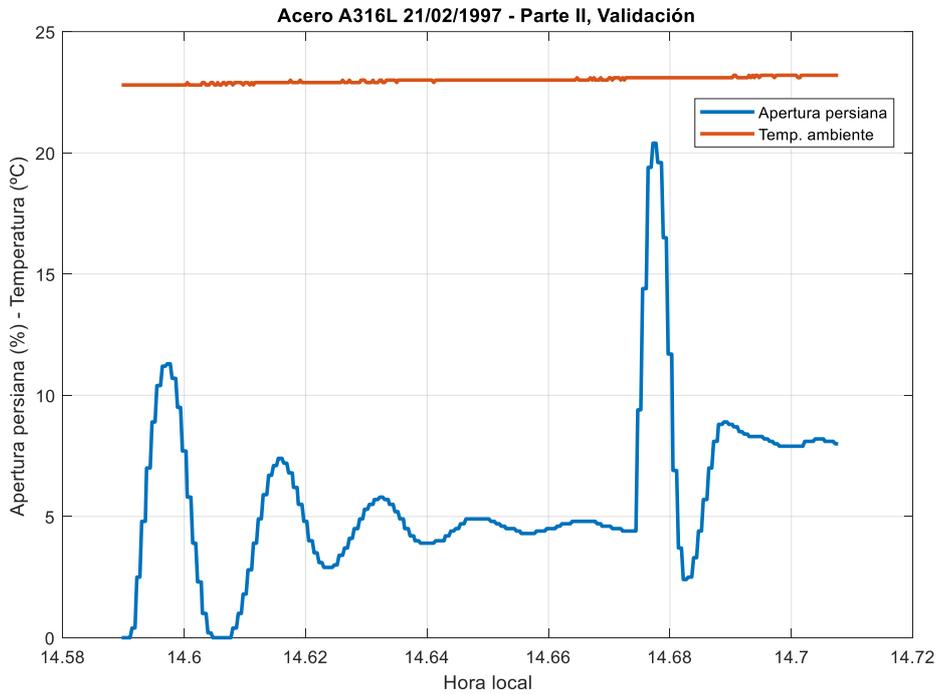


Figura 3.8. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 21/02/1997, parte II. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Por último, se va a validar los resultados obtenidos del proceso de calibración una vez más utilizando datos del día 6 de marzo de 1997. Los datos relativos a este día han tenido

que ser divididos en partes puesto que se encuentran intervalos donde el horno no está funcionando y por tanto deben ser tratados previamente y seleccionar así los datos válidos para el proceso de validación. Para empezar, se muestra en la Figura 3.9 y Figura 3.10 los resultados de validar el modelo no lineal con los parámetros medios calculados en la Tabla 13 para la primera parte de los datos del día de ensayo 6 de marzo de 1997. Se obtiene, como se puede observar, una validación bien ajustada a la señal del ensayo real. Se aclara que se trata de un ensayo donde las perturbaciones (radiación solar y temperatura ambiente) se encuentran prácticamente constantes, mientras que la apertura de la persiana tampoco sobrepasa más del 20 % lo cual tampoco pone a prueba de forma extrema la validez del modelo. Esto, como se podrá comprobar próximamente, ocurre igualmente con la segunda parte de los datos.

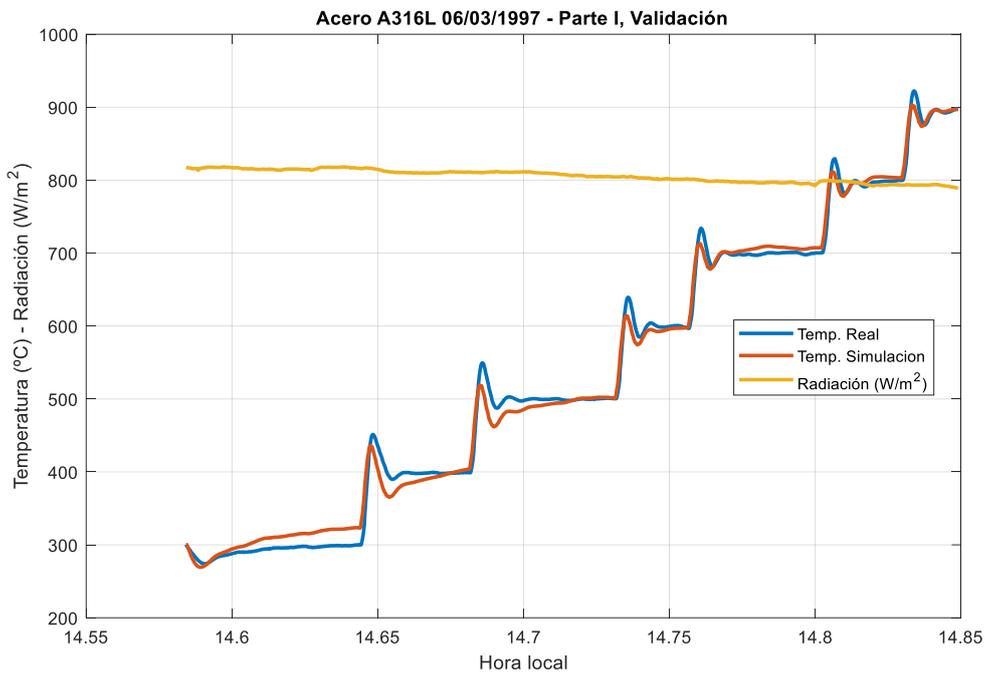


Figura 3.9. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 06/03/1997, parte I. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.

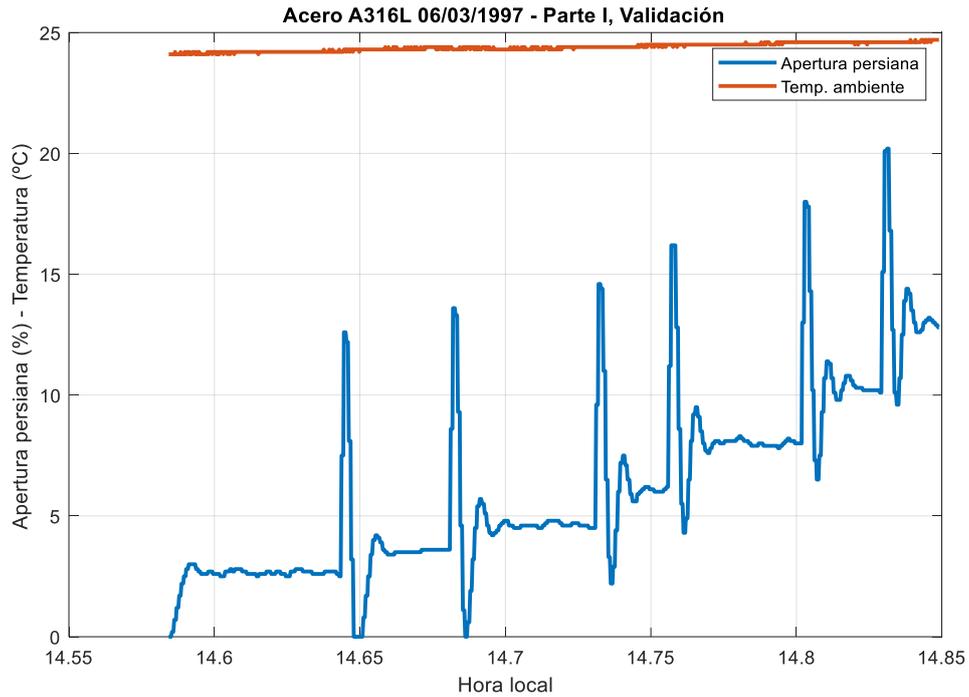


Figura 3.10. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 06/03/1997, parte I. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Finalmente, se valida el modelo no lineal para la segunda parte de los datos extraída del conjunto total de datos del día 6 de marzo de 1997. En la Figura 3.11 se muestra la salida del modelo (temperatura de la muestra de ensayo) y la radiación solar, y en la Figura 3.12 se muestra la entrada al modelo (apertura de la persiana) y la temperatura ambiente. Se observa que en esta segunda parte de los datos, al igual que ocurría con la primera parte de estos datos, el rango de operación es amplio, aunque no se alcanzan valores de la apertura de la persiana superiores al 20 %, y además, la radiación solar se encuentra estable, indicando un día despejado. Lo mismo ocurre con la temperatura ambiente, que se encuentra prácticamente constante en torno a los 25 °C.

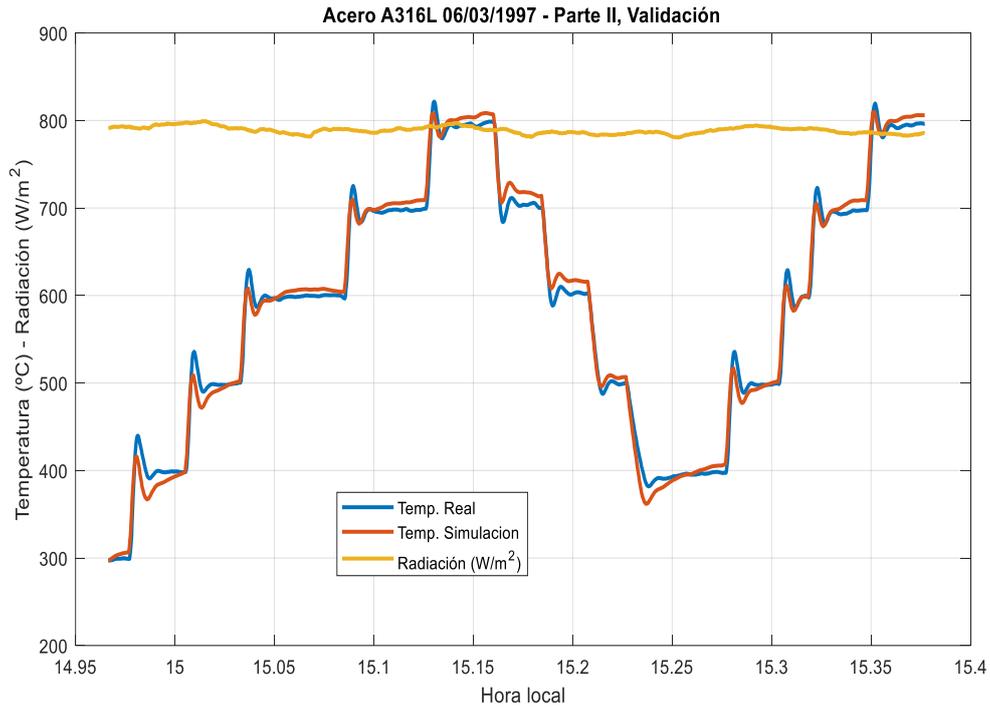


Figura 3.11. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 06/03/1997, parte II. Temperatura real, temperatura simulada y radiación solar.

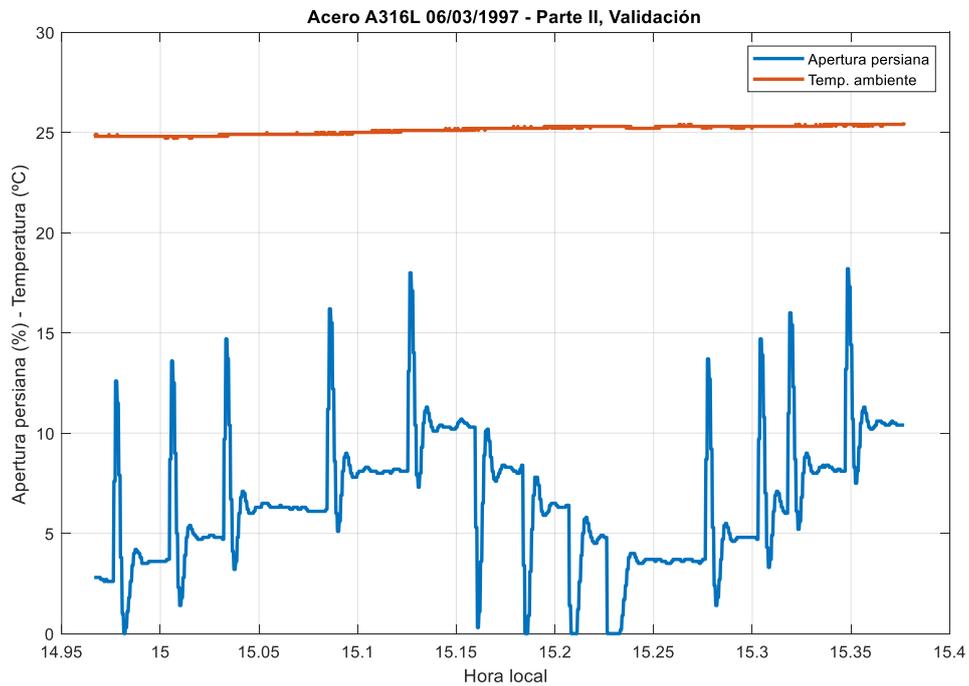


Figura 3.12. Validación muestra de Acero A316-L, ensayo del día 06/03/1997, parte II. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Finalmente, se muestran en la Tabla 14 los resultados de aplicar índices de funcionamiento para conocer de forma cuantitativa la calidad de la validez de los modelos respecto de los datos de ensayo reales.

Tabla 14. Índices de funcionamiento del modelo para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.

	21/02/1997, Parte I: Figura 3.5 y Figura 3.6	21/02/1997, Parte II: Figura 3.7 y Figura 3.8	06/03/1997, Parte I: Figura 3.9 y Figura 3.10	06/03/1997, Parte II: Figura 3.11 y Figura 3.12
Error máximo absoluto (°C)	48.8462	47.9281	43.1727	37.1670
Error medio absoluto (°C)	13.4392	14.8448	10.6757	9.7442
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	19.0920	19.3706	14.0278	12.1515
R²	0.9629	0.9661	0.9947	0.9926

Tal y como se observa, en general los datos del día 6 de marzo del año 1997 ofrecen mejores resultados que los datos del día 21 de marzo de ese mismo año, pese a que todos los resultados son válidos puesto que ofrecen errores medios y un RMSE bajos (menores a 15 °C), y un R² superior en todos los casos a 0.96 (lo que indica un buen ajuste) y un error máximo absoluto tampoco es desorbitado. La posible razón de que los datos del ensayo del día 6 de marzo sean mas satisfactorios es debido a que los datos del día 21 de febrero poseen una dinámica más variada. Por ejemplo, en la primera parte de estos datos (ver Figura 3.5) la radiación alcanza valores más altos de lo normal (en torno a 950 W/m²) mientras que en ninguna de las calibraciones no se llega a sobrepasar los 900 W/m². Por otro lado, en la segunda parte de los datos del día 21 de febrero (ver Figura 3.7) la radiación solar es más variable (provocada por la aparición de nubes) y por tanto se lleva al modelo no lineal a una situación más extrema que con los datos del día 6 de marzo.

3.1.2 Zirconia blanca

Los ensayos correspondientes a este material que se estudian en este trabajo son los que se muestran en la Tabla 15, que al igual que se hizo con el material de acero A316-L, se han clasificado los datos según sean utilizados para calibrar el modelo o para validarlo. Es necesario aclarar que tal y como se hizo anteriormente con el acero, los datos de los ensayos en este material presentan discontinuidades las cuales es necesario eliminar a la hora de calibrar el modelo, ya que perjudicarán a la calidad de dicha calibración, puesto que corresponden a medidas en las que el horno dejó de funcionar, o se hizo algún ajuste.

Tabla 15. Clasificación de los datos de la muestra de zirconia blanca en calibración o validación.

Datos de la pieza de ensayo	Uso de los datos
26 de febrero de 1997	Calibración
27 de febrero de 1997	Calibración
03 de marzo de 1997	Validación
04 de marzo de 1997	Validación

Otro factor importante que comentar, que ya se hizo en el capítulo 3 de este trabajo, es la falta de información sobre esta muestra, pues principalmente no se disponía del valor la masa de la muestra que se utilizó en los ensayos, lo cual es de vital importancia para poder calibrar el modelo. Por tanto, se buscó la manera de deducirla en base a los demás datos de los ensayos. Para deducirla se ideó un método iterativo con una hoja de cálculo y en base a la constante de tiempo del modelo lineal (ver ecuación (2.24)) que era conocida para distintos puntos de operación gracias a ensayos previos de otros autores [3]. Este proceso en el que se requirieron varias iteraciones se complicaba algo más pues se desconocía también en cierta manera la dependencia que tiene el calor específico de la pieza de zirconia blanca respecto de la temperatura, lo cual no ocurre con el resto de ensayos de las demás muestras, de cuyos datos si se dispone. El método iterativo utilizado para deducir la masa constó de varios pasos:

1. Introducir en una hoja de cálculo un valor de α_e y α_c , que intervienen en la ecuación (2.24).
2. Suponer para cada temperatura de operación distinta, el calor específico que suponga que la masa no varíe para ningún punto de operación (respecto de suponer que el calor específico de la muestra de zirconia blanca es de 670 J/(Kg·K) a 200 °C).
3. La masa resultante, constante en cada punto de operación mencionado, se introduce en el algoritmo genético, junto con los calores específicos designados.
4. Se simula el algoritmo genético para los datos de ensayo de un día concreto, por ejemplo, los del 27 de febrero de 1997, y se obtienen unos valores de α_e y α_c .
5. Introducir de nuevo α_e y α_c en la hoja de Excel (punto 1) y seguir los pasos hasta que se estabilice el valor de la masa.

Estos pasos se siguieron hasta que el resultado de la masa se hacía constante por sí solo en los distintos puntos de operación, siendo no necesario modificar el calor específico en la hoja de cálculo. Así se dedujo la masa de estos ensayos, que resultó estar en torno a los 200 gramos (teniendo en cuenta claramente la incertidumbre que supone esta deducción). Esto provocará que la calibración no sea tan exacta, pues se trata de un factor de incertidumbre más que se introduce en el modelo no lineal para esta muestra de ensayo. En la Tabla 16 se muestra la dependencia del calor específico con la temperatura de la muestra de zirconia utilizada para las simulaciones:

Tabla 16. Dependencia del calor específico con la temperatura para la muestra de zirconia blanca.

Temperatura de la muestra de zirconia (°C)	Calor específico (J/(Kg·K))
200	670
400	670
600	690
800	730
1000	760

Una vez deducida la masa y la dependencia del calor específico con la temperatura de la muestra (con la incertidumbre ya comentada), se procede a obtener los parámetros α_a , α_c y α_e mediante la aplicación del algoritmo genético. Primeramente se empieza con el ensayo 26 de febrero de 1997, para los cuales se aplica una población inicial de 200 individuos y un total de 20 generaciones, ya que se trata del equilibrio perfecto entre carga computacional, rapidez de las simulaciones y convergencia del algoritmo en los valores óptimos. Todo esto depende a su vez del intervalo escogido para cada parámetro, puesto que esa población inicial y ese número de generaciones se quedarían cortos si los intervalos son demasiado grandes, y viceversa. En resumen, el intervalo aplicado es de [0.6, 0.2] para α_a , de [150, 80] para α_c y de [0.6, 0.2] para α_e , todo esto habiendo aplicado el algoritmo genético de forma previa con intervalos mucho más grandes que los anteriores para poder acotarlos en los que se acaba de comentar.

Los resultados de la calibración del modelo con estos datos del día 26 de febrero de 1997 se muestra en la Figura 3.13 y Figura 3.14, donde el ensayo de dicho día (en lazo cerrado) consistió en un “tren” de cambios de consigna en la referencia de temperatura de la muestra en forma de escalones. Se trató de un día despejado de nubes tal y como se observa en la señal de radiación, que se presenta con una dinámica muy lineal. Por último a destacar de este ensayo, es que no se poseían datos sobre la temperatura ambiente y ésta ha sido supuesta con un valor de 25 °C, que aunque añade incertidumbre al modelo, esta incertidumbre no es de gran magnitud si se observa la ecuación diferencial del modelo, la ecuación (2.10), donde la temperatura ambiente aparece siempre comparándose con la temperatura de la muestra de ensayo y por tanto no influye tanto si la temperatura es de 30 °C o 25 °C pues al final se compara con temperaturas que van desde los 200 a los 1200 °C. El algoritmo genético proporciona el siguiente valor para los parámetros:

$$\alpha_a = 0.58462; \alpha_c = 146.18615; \alpha_e = 0.58610;$$

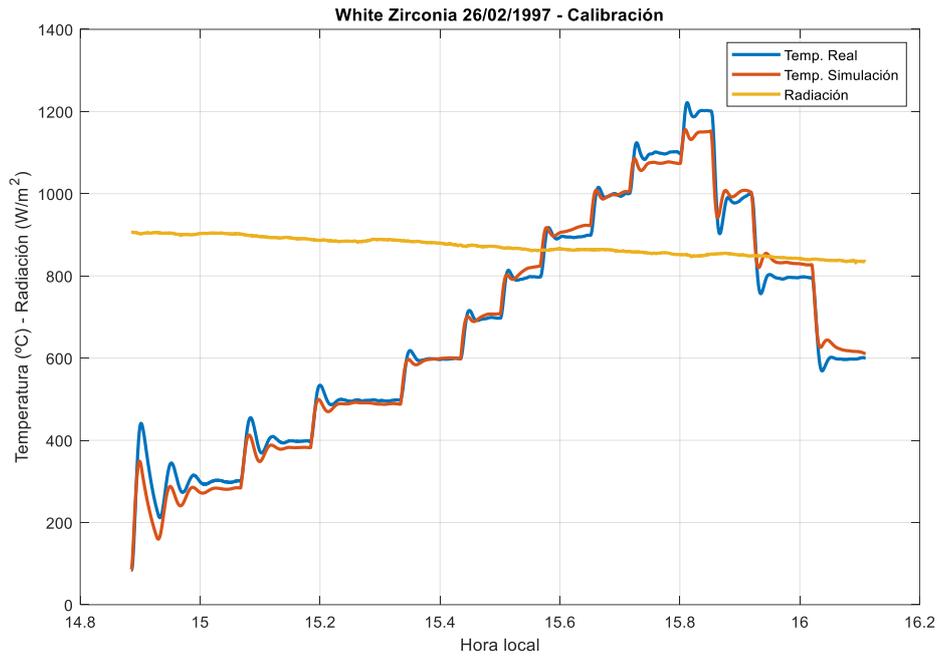


Figura 3.13. Calibración del modelo no lineal, muestra de zirconia blanca, 26/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.

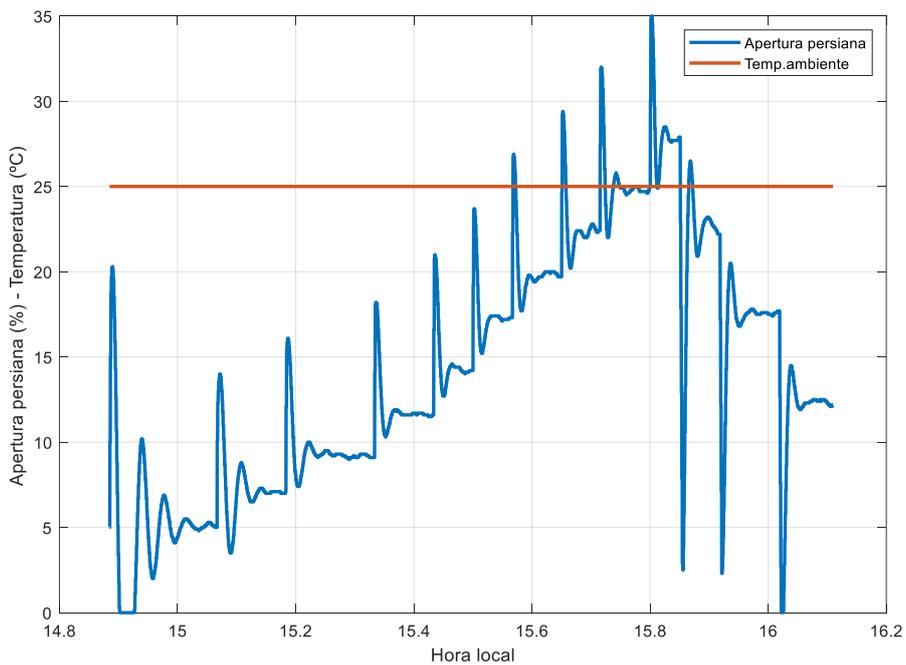


Figura 3.14. Calibración del modelo no lineal, muestra de zirconia blanca, del 26/02/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

El siguiente y último ensayo que se utiliza para calibrar es el del día 27 de febrero de 1997 (ver Figura 3.15 y Figura 3.16), un día después del anterior. En este ensayo se cubre también un rango de operación amplio, alcanzando temperaturas del orden de los 1200 grados en el ensayo real. Además, se trata de un día sin nubes dada la señal de radiación

mostrada en la Figura 3.15. El resultado de los parámetros estimados por el algoritmo genético es:

$$\alpha_a = 0.46509; \alpha_c = 127.27742; \alpha_e = 0.26373$$

Se observa que el valor de la emisividad que proporciona el algoritmo genético varía bastante de un ensayo a otro, y ésta puede explicarse en base a la incertidumbre del modelo no lineal y a las demás suposiciones que se han hecho en torno esta muestra de ensayo como la masa, el calor específico, o la propia temperatura ambiente durante el ensayo que es desconocida y ha sido supuesta a 25 °C. Además, el someter a estos materiales a altas temperaturas suele ser con el fin de tratar la pieza, eliminar impurezas u otros motivos que pueden llegar a propiciar cambios en la propia dinámica de la misma, alterándose sus propiedades físicas.

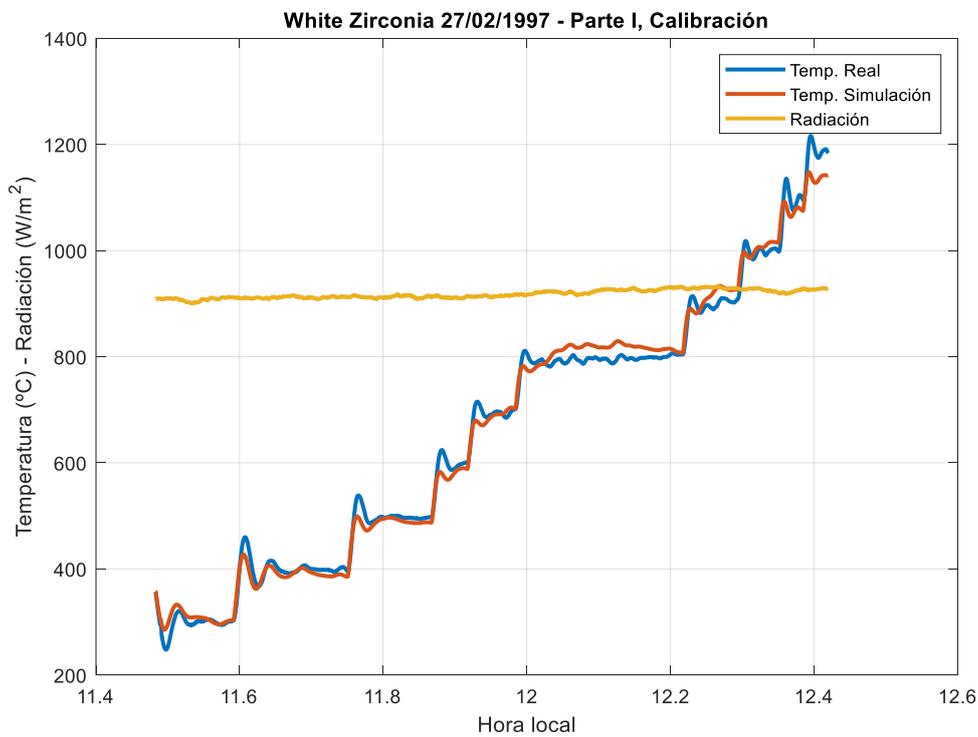


Figura 3.15. Calibración del modelo no lineal, muestra de zirconia blanca, del 27/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.

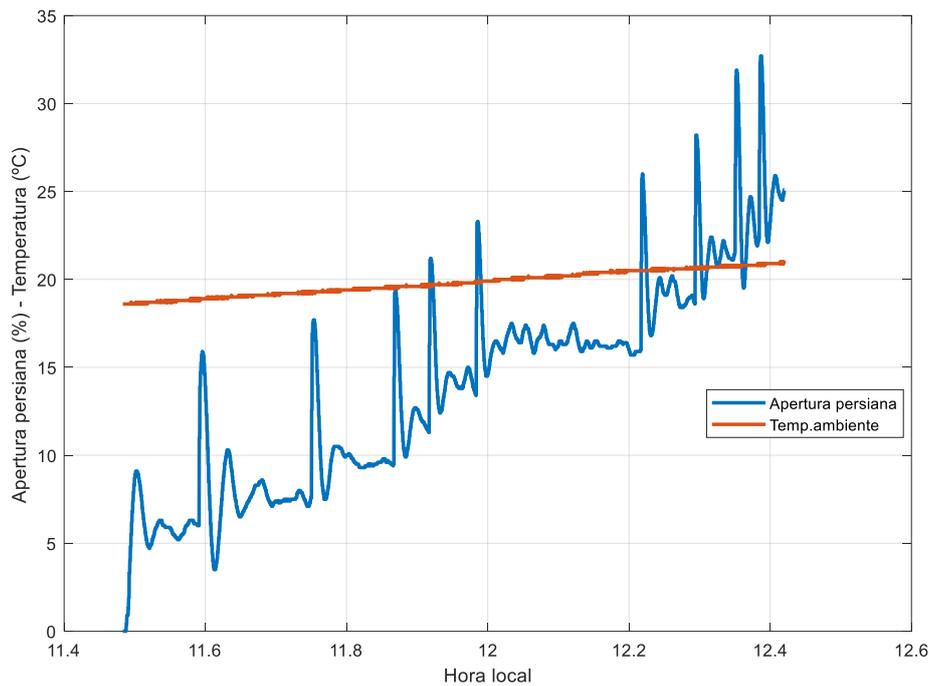


Figura 3.16. Calibración del modelo no lineal, muestra de zirconia blanca, 27/02/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Como se puede observar, de los ensayos realizados para las distintas calibraciones presentan un factor común, y es que el nivel de radiación medido se mantiene constante prácticamente durante todo el ensayo. Es notorio también que en todos los ensayos la temperatura de la muestra alcanza valores superiores a los 1000 °C, tanto en el ensayo del día 26 de febrero de 1997 (Figura 3.13) como en el del día 27 de febrero de 1997 (Figura 3.15), y en esa intervalo de temperatura el modelo se ajusta peor, quedándose por debajo la temperatura simulada del modelo no lineal respecto de la temperatura del ensayo real, lo cual parece indicar que el modelo no lineal posee algún parámetro con incertidumbre que no ajusta bien la dependencia del mismo con la temperatura, y se refleja cuando el rango de operación aumenta por encima de los 1000 grados; esta dependencia puede estar mal estimada por el calor específico, cuya dependencia con la temperatura de la muestra ha sido deducida tal y como se comentó anteriormente para esta pieza. Esta dependencia se calculó en base a los modelos lineales experimentales plasmados en [3], en concreto, a las constantes de tiempo de dichos modelos lineales, siendo el último punto de operación para el que fueron calculado de 1000 °C; por tanto, tiene sentido que el modelo no lineal no funcione del todo bien para temperaturas superiores a esa temperatura con la muestra de zirconia blanca puesto que para ese rango de temperatura no se ha podido deducir la relación entre el calor específico y la temperatura de la muestra.

Finalmente se recogen en la Tabla 17 los parámetros que proporciona el algoritmo genético tras calibrar el modelo no lineal; en la última fila de la tabla se calcula la media para cada parámetro de los dos resultados obtenidos en las calibraciones.

Tabla 17. Parámetros obtenidos de calibrar el modelo no lineal para los distintos ensayos de la muestra de zirconia blanca.

Parámetros de la calibración, Zirconia blanca	α_a	α_c	α_e
26/02/1997	0.58462	146.18615	0.58610
27/02/1997	0.46509	127.27742	0.26373
Valor medio:	0.52486	136.73179	0.42492

Una vez calibrado el modelo con los datos de los 2 ensayos anteriores, se procede a validarlo utilizando el valor medio de los parámetros estimados en dichas calibraciones, el cual se muestra en la Tabla 17 presentada con anterioridad. Puesto que los valores que se han tomado como parámetros finales (la media de los obtenidos en las calibraciones) ya no son los mismos exactamente que los que ha proporcionado el algoritmo genético, se procede primeramente a validar estos parámetros medios con los mismos ensayos de calibración para asegurar que los parámetros son válidos. Por ello, se presenta a continuación la validación para el día 26 de febrero de 1997 en la Figura 3.17 y la Figura 3.18:

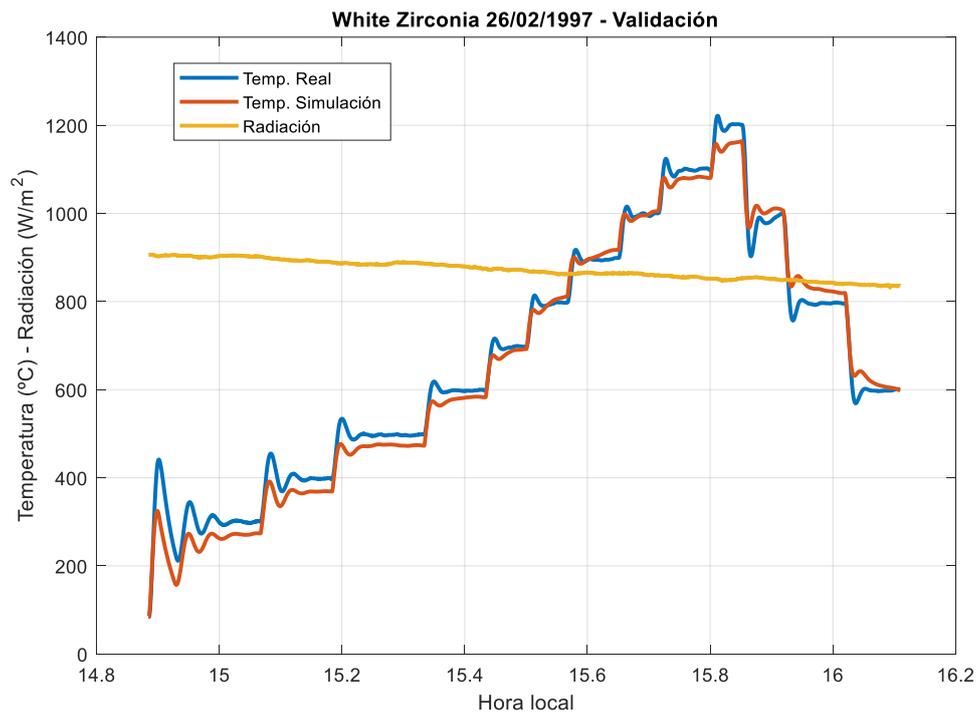


Figura 3.17. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 26/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.

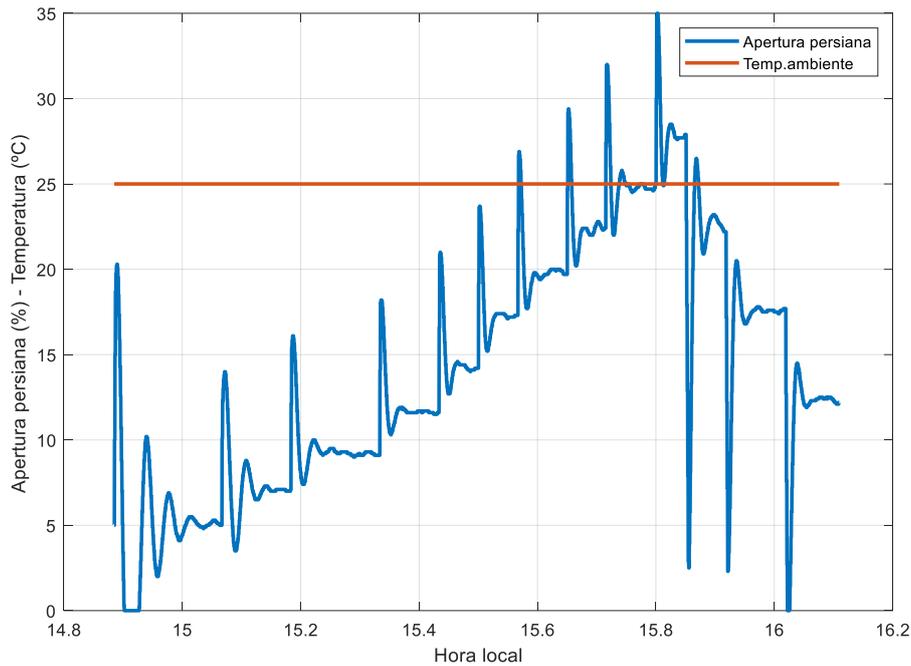


Figura 3.18. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 26/02/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Como se puede observar, los resultados de validación con los parámetros medios con los datos de ensayo del día 26 de febrero de 1997 (ver Figura 3.17 y Figura 3.18) no varían mucho respecto de los resultados que se obtuvieron en la propia calibración para dicho día (ver Figura 3.13 y Figura 3.14). A continuación, se muestra la validación con los datos del día 27 de febrero de 1997 (ver Figura 3.19 y Figura 3.20) con los parámetros medios, igual que el caso anterior, donde se puede apreciar como al igual que con la anterior validación, el resultado es muy parecido al obtenido cuando se calibró el modelo no lineal para dichos datos de ensayo (ver Figura 3.15 y Figura 3.16), aunque algo desmejorado como es lógico puesto que no son los mismos valores que estimó el algoritmo genético. Esto se aprecia notablemente en el fenómeno que ocurre sobre las 12 horas locales donde la temperatura de la muestra se “despega” de la temperatura del ensayo real de forma más notoria que como lo hacía en la propia calibración, y c.

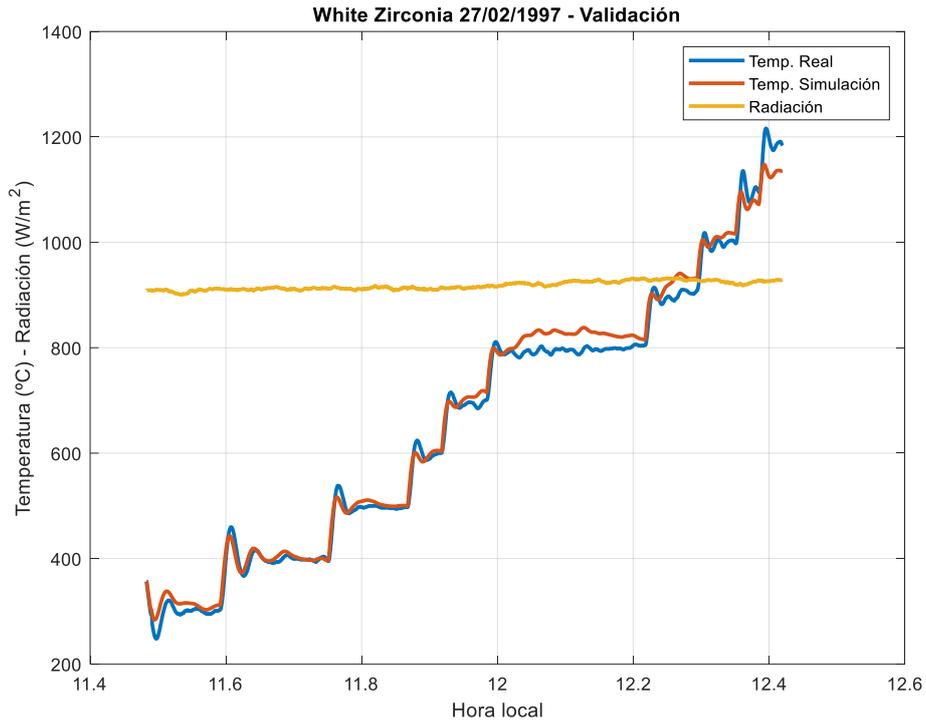


Figura 3.19. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 27/02/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.

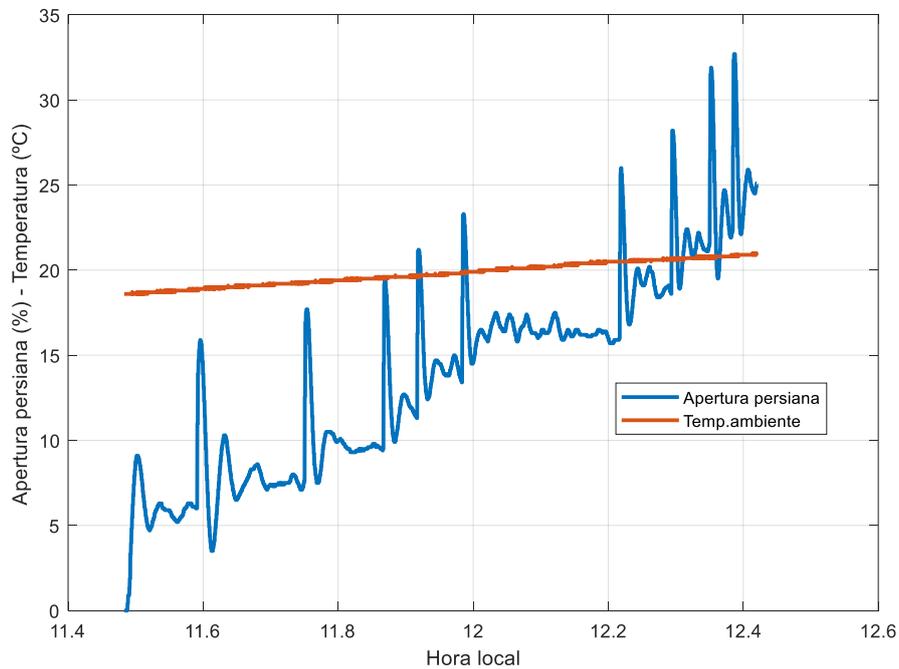


Figura 3.20. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 27/02/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Una vez validado el modelo para los mismos datos que se usaron en la calibración, se comienza validando el modelo no lineal para los ensayos designados para ello que se presentó en la Tabla 15, empezando por el ensayo del día 3 de marzo de 1997. Los

resultados de dicha validación se muestran a continuación en la Figura 3.21 y Figura 3.22, donde se aprecia cómo el modelo no lineal posee el mismo tipo de dinámica que el ensayo real, aunque la exactitud del modelo no lineal no es muy alta, habiendo un margen de error durante prácticamente toda la simulación respecto de la señal de temperatura del ensayo real. Esto se debe en gran parte a que este ensayo que se ha utilizado para validar presenta grandes variaciones en la radiación solar, mientras que los ensayos utilizados para calibrar fueron en días despejados. Por tanto, es lógico que las calibraciones realizadas por el algoritmo genético no sean tan ajustadas a la hora de medir el comportamiento frente a variaciones grandes de esta señal de entrada (considerada como perturbación del sistema) al modelo no lineal.

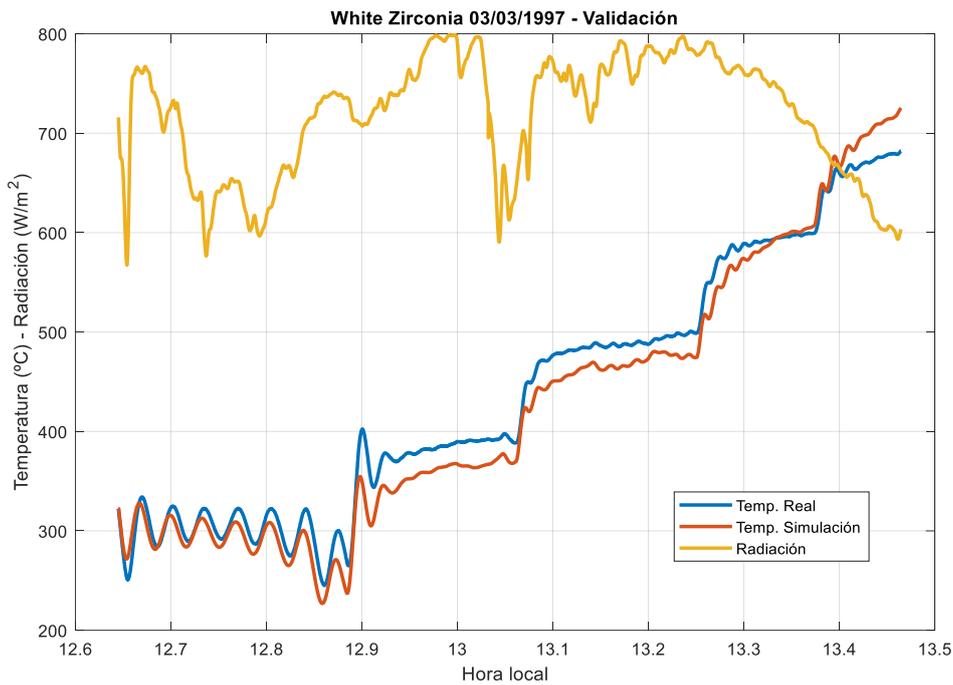


Figura 3.21. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 03/03/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.

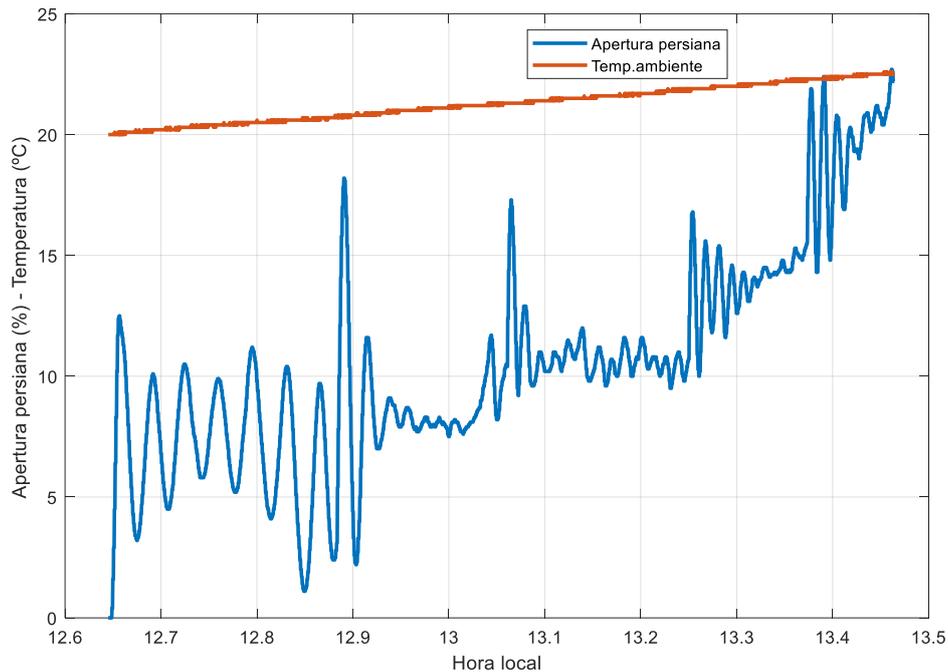


Figura 3.22 Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 03/03/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

La siguiente validación que se muestra a continuación (ver Figura 3.23 y Figura 3.24) es la referente a los datos de ensayo del día 4 de marzo de 1997. Se trata de un ensayo donde el día fue despejado ya que la señal de la radiación se mantiene constante cerca de los 1000 °C; en esta simulación de los datos del día 4 de marzo de 1997 se aprecia como se produce una rampa en la temperatura (al igual que ocurría con el ensayo del 27 de febrero de esta misma pieza sobre las 12 horas locales, como se comentó) en torno a las 11.5 horas, a diferencia de la temperatura real que se queda estable. Este fenómeno perjudica la validación pues implica que se produzca un error constante entre la señal de temperatura real y simulada. Este fenómeno tiene claramente su origen en la apertura de persiana pues en la Figura 3.24 se aprecia como las oscilaciones de esta señal no son en torno a un valor si no que tienen una tendencia creciente. Esta distopía entre los datos de simulados y los del ensayo real puede deberse a algún ajuste manual que hizo durante el ensayo en aquel día, o un fallo en la adquisición de los datos o cualquier otro factor que quedó reflejado en los datos que en este trabajo hoy se utilizan. Si este fenómeno no estuviera, la señal simulada de la temperatura estaría más ajustada a la temperatura real de la pieza. Desgraciadamente, no se disponen de más datos válidos de esta pieza de zirconia blanca que puedan proporcionar mejores validaciones del modelo no lineal para la misma, y además era preferible (a modo de precaución) también utilizar los datos de este día, del 4 de marzo de 1997, para esta última validación en vez de usarlos para calibrar ya que contenían este fenómeno y no interesa que el algoritmo genético utilice datos que pueden no pertenecer a la dinámica real de la pieza.

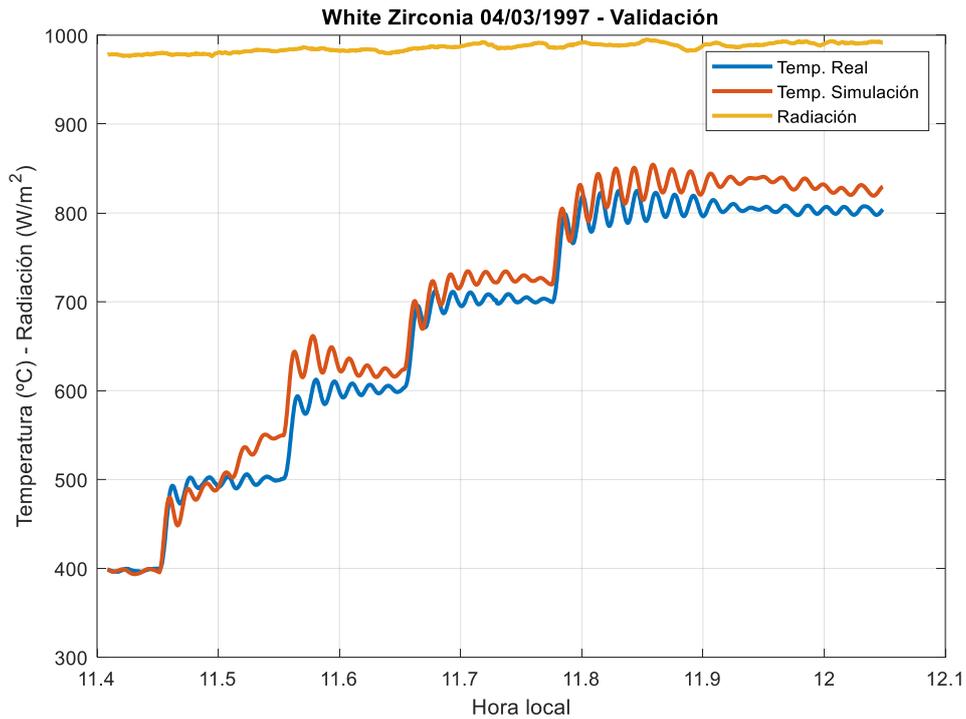


Figura 3.23. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 04/03/1997. Temperatura real, temperatura simulada y radiación.

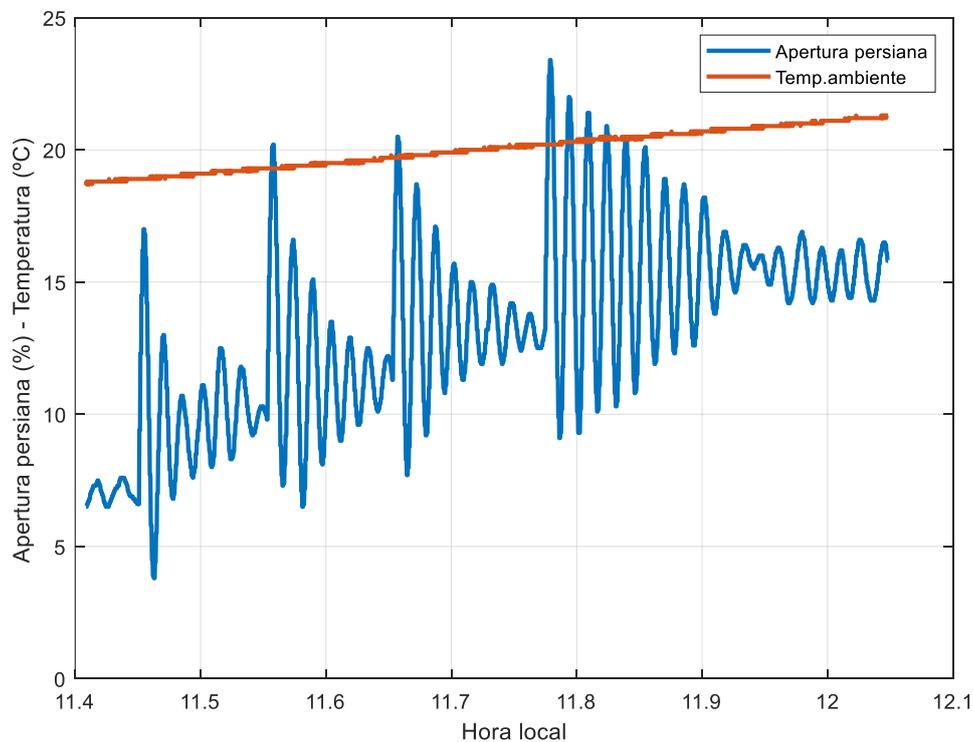


Figura 3.24. Validación del modelo no lineal, muestra de Zirconia blanca, del 04/03/1997. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Por último, se procede a calcular los índices de funcionamiento para cada una de las validaciones que se han presentado para la media de los parámetros obtenidos de las dos

calibraciones realizadas para la pieza de zirconia blanca. Estos resultados se muestran a continuación en la Tabla 18:

Tabla 18. Índices de funcionamiento del modelo para la zirconia blanca en el ensayo de validación del 03 de marzo de 1997.

	Validación 1, 26/02/1997 (ver Figura 3.17 y Figura 3.18)	Validación 2, 27/02/1997 (ver Figura 3.19 y Figura 3.20)	Validación 3, 03/03/1997 (ver Figura 3.21 y Figura 3.22)	Validación 4, 04/03/1997 (ver Figura 3.23 y Figura 3.24)
Error máximo absoluto (°C)	136.55	78.35	62.33	76.29
Error medio absoluto (°C)	28.24	18.05	18.98	23.95
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	35.22	22.72	21.56	27.50
R ²	0.98	0.9918	0.9790	0.9600

Se observa que el error máximo absoluto es algo elevado en todos los casos, especialmente en la validación del día 26 de febrero de 1997 donde alcanza los 136 °C. Esto ya se explicó anteriormente, y ocurre cuando la temperatura de la muestra de ensayo supera los 1000 °C, que incluso cuando se calibró el modelo no lineal con el algoritmo genético no se pudo ajustar bien dicha zona seguramente a la incertidumbre existente por culpa de haber deducido datos como la masa y la relación del calor específico con la temperatura (esto se aprecia las gráficas de calibración para dicho día, en la Figura 3.13). El error máximo absoluto que se obtiene en la validación con los datos del día 27 de febrero es de 78.35 °C y tiene también la misma explicación comentada, a parte del fenómeno que se da sobre las 12 horas locales que se comentó también en su momento. Finalmente, los errores máximos absolutos que se dan en los días 3 y 4 de marzo son mas pequeños que en los anteriores días pese a que se tratan de datos designados y utilizados puramente para la validación del modelo no lineal.

Siguiendo con el análisis de los índices de funcionamiento obtenidos (ver Tabla 18) se aprecia cómo el error absoluto medio y el RMSE están en torno a los 20 °C para las validaciones de los días 27 de febrero de 1997 y el 3 de marzo de 1997, mientras que para los días 26 de febrero y 4 de marzo de 1997 se acercan más a los 30 °C. lo cual refleja lo obtenido en las gráficas correspondientes. Se considera unos índices aceptables dada las condiciones en las que se han realizado las simulaciones, ya que el algoritmo genético ha conseguido un ajuste bastante aproximado frente a la incertidumbre de las variables sobre la pieza tratada en aquellos ensayos. Estos errores de modelado han influido por tanto en la calibración, y como es lógico, se han arrastrado hasta la consiguiente validación.

Por último, el valor obtenido de R^2 para las validaciones realizadas se aprecia que es igual o superior a 0.96, lo que parece indicar que el modelo no lineal, calibrado para la pieza de zirconia blanca, posee una dinámica que se ajusta mucho a la real, puesto que este índice de funcionamiento (tal y como indica la ecuación (2.14)) está muy cerca de 1.

3.1.3 Sinterizado de cobre

Previamente a presentar los resultados tanto de calibración como de validación para la muestra de cobre, se pretende hacer una breve descripción de los ensayos que se han realizado con la misma, ya que se dispone de mucha más información que respecto de otras piezas. Generalmente, la muestra tratada se dispone como se muestra en la Figura 3.25, donde se aprecia como la muestra es realmente un conjunto de cables de cobre de un diámetro determinado apilados en una caja metálica, con distintos termopares incluidos en ella para obtener las mediciones de temperatura necesarias durante la realización de los ensayos.

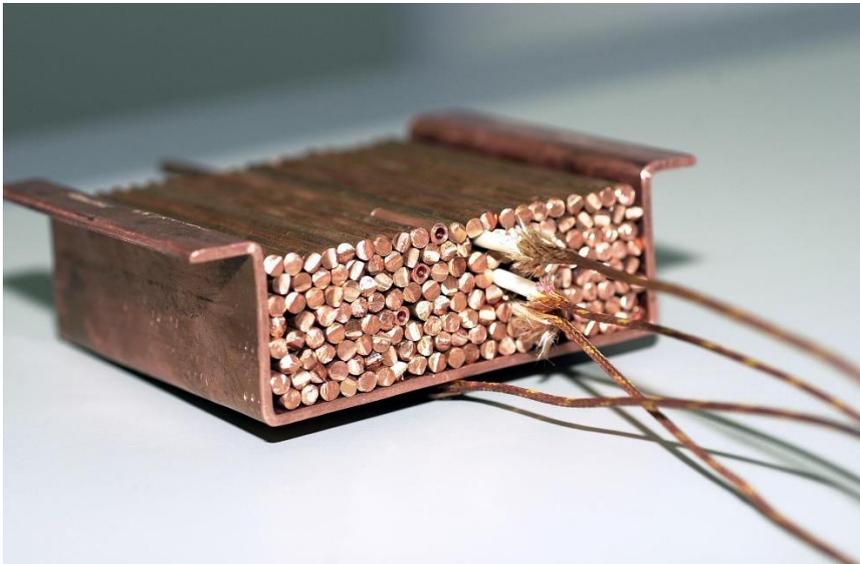


Figura 3.25. Disposición de la muestra de cobre con los termopares dentro de la caja metálica. Imagen cortesía de la PSA.

En general, en muchos de estos ensayos se estudiaba las diferencias entre distintas posiciones de los termopares en las temperaturas obtenidas dentro de la caja con los alambres de cobre. Esto, como se irá viendo durante las distintas calibraciones y validaciones que se mostrarán en esta sección, es un punto importante ya que introducirá otra incertidumbre en el modelo, puesto que este modelo no lineal presentado por la ecuación (2.10) en capítulos anteriores para el desarrollo de este trabajo se trata de un modelo simplificado el cual no contempla la posición del termopar que mide la temperatura dentro de la caja donde se contiene la muestra de ensayo (tampoco contempla otros factores, como la posición de la mesa en sus coordenadas XYZ, lo cual se comentará más adelante), correspondiente a la salida del modelo.

Los ensayos que se realizaron con esta muestra se realizaron en unas condiciones de temperatura, presión y condiciones ambientales de composición de la atmósfera determinadas, lo cual se consigue gracias a una instalación adicional que se conoce como cámara de vacío o MINIVAC. En estos ensayos se trabajó con la cámara de vacío en la cual se introducía la muestra (una imagen de la cámara de vacío se muestra en la Figura

3.26, y otra del interior en la Figura 3.27) con el objetivo de trabajar con unas condiciones ambientales del aire específicas; en este tipo de ensayos, estas condiciones ambientales eran una “mini atmósfera” de un gas denominado HYD45, con una composición de 5% de H₂ y 95% N₂. Esta cámara de vacío era capaz de conseguir (aparte de la atmósfera nombrada) una presión de entre 1 μ Torr hasta 1.5 kTorr. Por último, la cámara de vacío presentaba una ventana de cuarzo de 350 mm de diámetro, a través de la cual entraba la radiación en la misma, y en cuya base, en el centro, había una abertura en la que se colocaba la caja con los cables de cobre apilados.

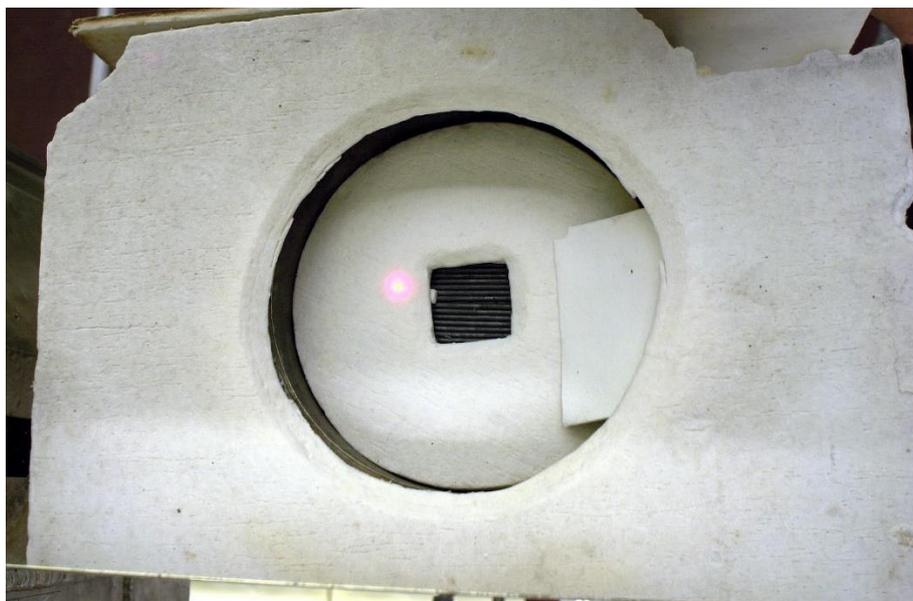


Figura 3.26. Cámara de vacío presente en el horno solar en cuyo centro se visualiza la muestra de cobre a través de una abertura cuadrada de 80 mm de lado. Imagen cortesía de la PSA.

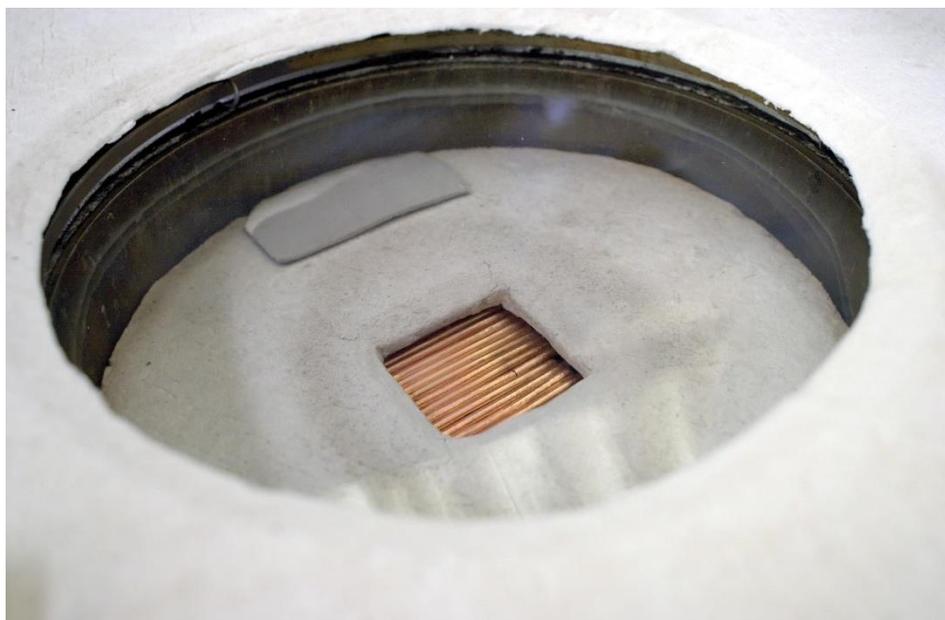


Figura 3.27. Interior de la cámara de vacío, en cuya base se muestra la abertura por donde recibe la radiación la muestra de cobre. Imagen cortesía de la PSA.

En algunos de estos ensayos además se realizaba el experimento de una forma distinta a como se expuso en el inicio del trabajo cuando se describió la instalación (ver Figura 2.1).

En esta disposición distinta, la muestra recibía la radiación de forma vertical (estando la muestra colocada de forma horizontal), ya que se hacía pasar la radiación entrante a la cámara reflejándola previamente en un espejo adicional tal y como se enseña en el esquema de la Figura 3.28 y de la Figura 3.29. La cámara de vacío o MINIVAC se muestra en detalle en el esquema de la Figura 3.29, con la ventana de cuarzo de 350 mm de diámetro, a través de la cual entraba la radiación en la misma, y en cuya base de alúmina, en el centro, había una abertura en la que asomaba la parte superior de la caja con los cables de cobre apilados. Además, la caja se encontraba apoyada sobre un soporte de acero tal y como se muestra en el diagrama. Toda esta explicación tiene una implicación, y es que el espejo de redireccionamiento introduce un valor de reflectividad adicional (como ρ_h y ρ_c , que eran las reflectividades del heliostato y el espejo concentrador) que en función de la suciedad del mismo, se perderá más o menos radiación. Esto se intentaba compensar acercando más la muestra a este espejo de redireccionamiento, pero como se puede suponer, este factor será una incertidumbre más añadida al modelo.

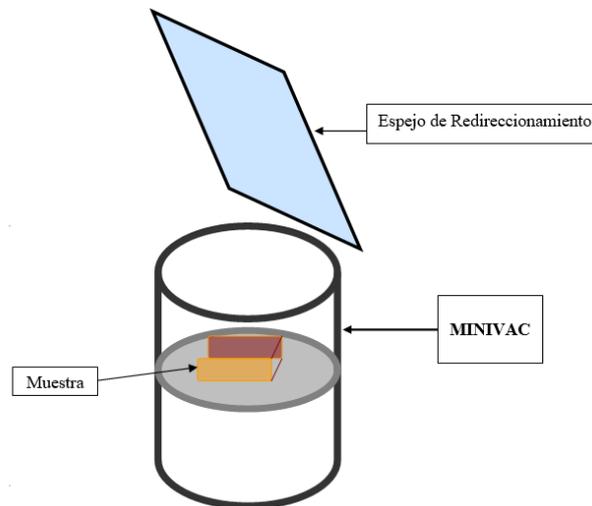


Figura 3.28. Esquema de la disposición de ciertos experimentos donde la muestra recibe de forma horizontal la radiación dentro de la cámara de vacío gracias a un espejo de redireccionamiento. Figura cortesía de la PSA.

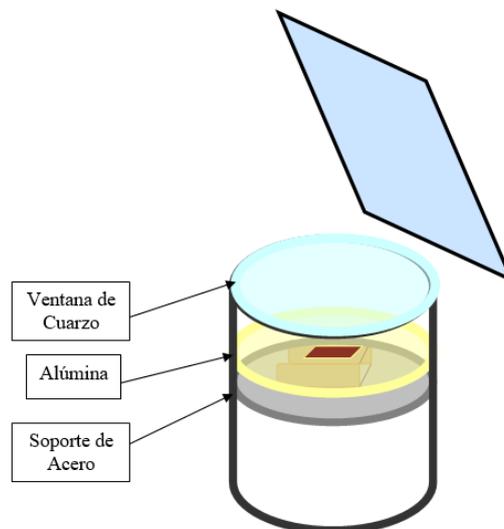


Figura 3.29. Esquema de la disposición de ciertos experimentos donde la muestra recibe de forma horizontal la radiación dentro de la cámara de vacío gracias a un espejo de redireccionamiento, en detalle. Figura cortesía de la PSA.

Tal y como se verá en el desarrollo de este capítulo, se comprobará como el modelo no lineal para esta pieza funciona algo peor, y esto se debe al material en cuestión, que se trata de un conjunto de cables y que además, según el ensayo, el material estará ya tratado (proceso de sinterizado) de algún ensayo anterior o no, lo que implicará un cambio en las propias propiedades del material que provocarán, en consecuencia, que éste se comporte físicamente de distinta forma. Por tanto, el modelo no lineal que se utiliza para esta muestra no abarca la complejidad de la muestra tratada y por tanto la incertidumbre que absorberán los parámetros que estima el algoritmo genético será más pronunciada que con otras piezas de ensayo.

Principalmente se disponen de 2 grupos de datos relacionados con dos campañas de investigación sobre el proceso de sinterizado de cobre; una de ellas corresponde a mayo de 2012 (concretamente, los días de ensayo 8,9,10 y 11 de mayo) en la que se realizaron diversas pruebas y estudios de modelado y control del horno basados en el proceso de sinterización del cobre (por ejemplo, como en [18]); el otro grupo de datos es en torno a los años desde 2001 a 2004, donde se dispone de una gran variedad de ensayos y de datos sobre este tipo pieza. Sin embargo, tras muchas calibraciones y validaciones con este último grupo de datos, se ha decidido no incluirlo en este trabajo y solo trabajar con los datos de 2012 puesto que los resultados de calibraciones entre los ensayos de 2001 a 2004 eran muy distintos entre sí, y por tanto a la hora de validar el modelo no lineal (tanto para los propios datos, pero con los valores medios obtenidos de las calibraciones, como con datos de días de ensayo distintos) eran muy malos. Esto es debido a que probablemente los experimentos de aquellos años se hicieron innovando en cada ensayo (por ejemplo, con el número de cables, el diámetro de los mismos, la posición de la caja en la cámara de vacío, etc.) y de manera distinta a los ensayos que se tienen de 2012 y seguramente las condiciones experimentales eran distintas también. Generalmente, en este tipo de muestra influyen muchas variables que el propio modelo no incluye como son: la uniformidad en el diámetro de los cables que hay contenidos en la caja; el aire que existe entre los cables (factor que influye en la pérdida de calor); la posición de la caja que, como se ha comentado a veces se disponía de una manera u otra según el ensayo, además de las propias coordenadas XYZ de la mesa de muestras; el termopar utilizado puesto que, de todos los que se utilizaban en los ensayos, se utiliza sólo uno en concreto como salida del modelo no lineal; las condiciones impuestas dentro de la cámara de vacío; y uno de los factores más importantes, el grado de sinterizado que presentara la pieza, puesto que en algunos datos si existe información de si en ese momento la pieza estaba sinterizada de un ensayo anterior, mientras que en otros directamente no se nombra, teniendo por tanto la muestra propiedades distintas, según el ensayo.

Por tanto, a partir de este momento para la muestra de cobre, los datos que se utilizarán serán los de los ensayos que se realizaron en 2012. En todos los ensayos realizados, los cables tenían un diámetro de 2 mm. Estos cables de cobre se amontonaron en una caja de superficie $80 \times 80 \text{ mm}^2$, con una altura de la caja de 30 mm que contenían aproximadamente 8 capas de cables, tal y como se muestra en la Figura 3.30. Así, sabiendo el número de cables por capa, el número de capas, la longitud de los cables (correspondían al largo de la caja, 80 mm) y su diámetro y la propia densidad del cobre (aproximadamente 8960 kg/m^3), es fácil deducir (de forma aproximada) la masa total de cobre utilizada en el ensayo, sabiendo que la densidad de algo es su masa dividida entre el volumen que ocupa:

$$m_{s,cobre} = 23 \frac{\text{cables}}{\text{capa}} \cdot 8 \text{ capas} \cdot \pi \left(\frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 0.080 \text{ m} \cdot 8960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.414 \text{ kg}$$

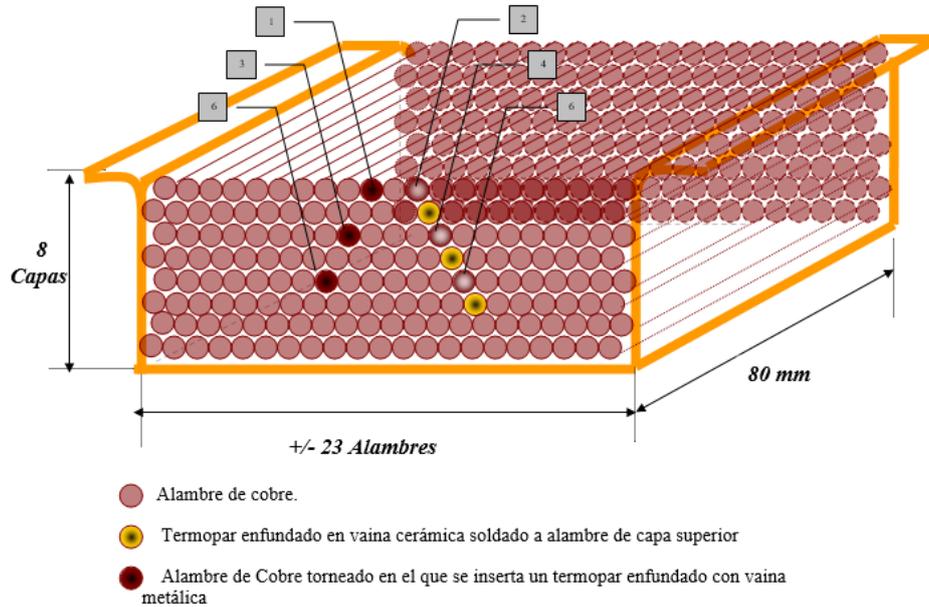


Figura 3.30. Disposición de la caja con los cables de cobre y los termopares en los ensayos. Figura cortesía de la PSA.

Por último, para terminar de definir la muestra de ensayo, se presenta a continuación la Tabla 19 donde se relaciona el calor específico del cobre respecto de la temperatura a la que se encuentre [8].

Tabla 19. Dependencia del calor específico con la temperatura para la muestra de cobre.

Temperatura de la muestra de cobre (°C)	Calor específico (J/(Kg·K))
200	356
400	396
600	416
800	435
1000	456
1300	494

El primer paso previo a calibrar el modelo no lineal para los datos de esta muestra es el de clasificar los datos que se van a usar en datos de calibración o datos de validación, para lo cual se impondrá el criterio de escoger para calibrar los datos que abarquen un mayor rango de operación de la salida. Esta clasificación de los días de ensayo se muestra en la Tabla 20, donde se muestran ordenados según la fecha de ensayo.

Tabla 20. Clasificación de los datos de la muestra de cobre en calibración o validación.

Datos de la pieza de ensayo (cobre)	Uso de los datos
8 de mayo de 2012	Calibración
9 de mayo de 2012	Calibración
10 de mayo de 2012	Validación

11 de mayo de 2012	Validación
--------------------	------------

Los datos utilizados en este trabajo corresponden a distintos ensayos de controladores en los días 7,8 ,9 y 10 de mayo de 2012. La metodología seguida, como se explica en la Tabla 20, ha sido la de usar la mitad de los días para calibrar el modelo, y la otra mitad para validarlo. Por ello, se han utilizado los días 8 y 9 de mayo de 2012 para calibrar (en base al rango de operación abarcado) y obtener un valor de los parámetros α_a , α_c y α_e , y luego del resultado obtenido se ha hecho la media de cada parámetro y se simulado el modelo con los datos de los días 10 y 11 de mayo de 2012 para validarlo.

Dada la metodología seguida para esta muestra de ensayo, donde se realizará la media aritmética de los valores de las alfas obtenidos en los dos ensayos (8 y 9 de mayo de 2012), no sólo se validará sobre los datos de los otros días de ensayo (10 y 11 de mayo de 2012) sino que se validará sobre los mismos ensayos de calibración también.

Para comenzar, se comienza calibrando el modelo no lineal para la muestra de cobre con los datos del día 8 de mayo de 2012. Los resultados, mostrados en Figura 3.31 y Figura 3.32 (tras aplicar una población inicial de 200 individuos, 20 generaciones y unos intervalos de [0.1,0.01] para α_a , [30,10] para α_c y [1.3,0.7] para α_e) enseñan que fue un ensayo en el que se aplicó un tren de escalones ascendentes en la apertura de la persiana, en un día donde la presencia de nubes (probablemente) provocó grandes variaciones en la radiación solar que llegaba a la muestra. Las grandes variaciones en la radiación solar es el motivo principal por el que se ha escogido este ensayo como ensayo de calibración, ya que proporciona información al modelo sobre una de las entradas más determinantes como es la radiación.

Como se aprecia, el ajuste entre la señal del ensayo real y la simulada con los parámetros del genético no es muy exacto, sobre todo entre las 14 y las 15 horas locales, pero es aceptable dada la entrada de radiación que es tan inestable y dado el modelo no lineal tan simplificado que trata de modelar un tipo de muestra tan compleja.

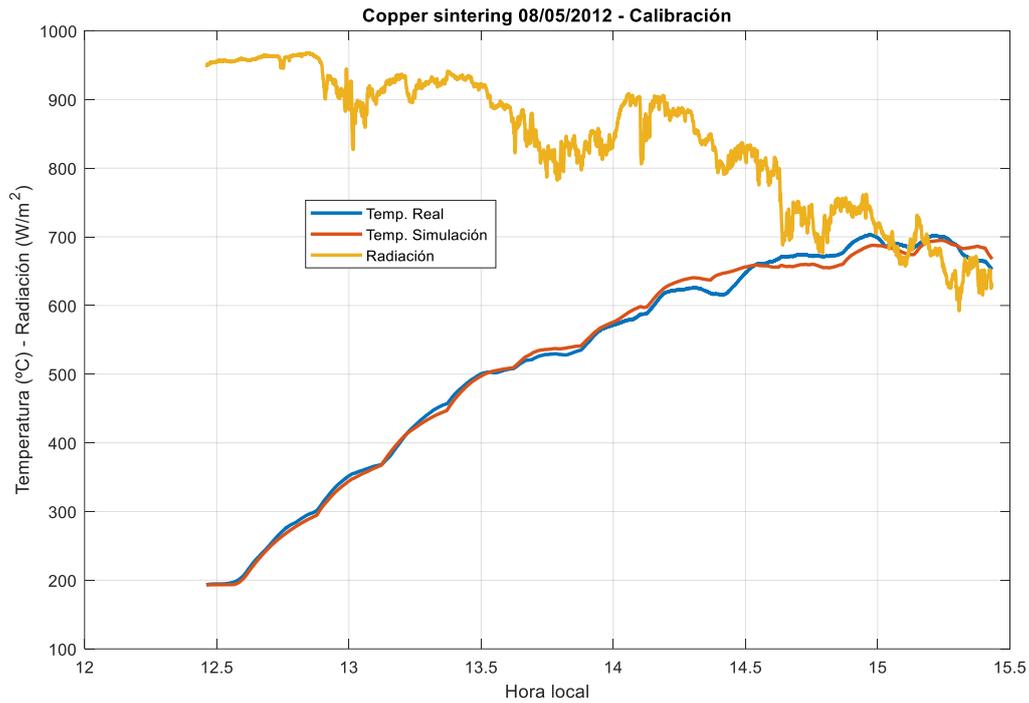


Figura 3.31. Calibración del modelo no lineal, muestra de cobre, 08/05/2012. Temperatura de la muestra y radiación solar.

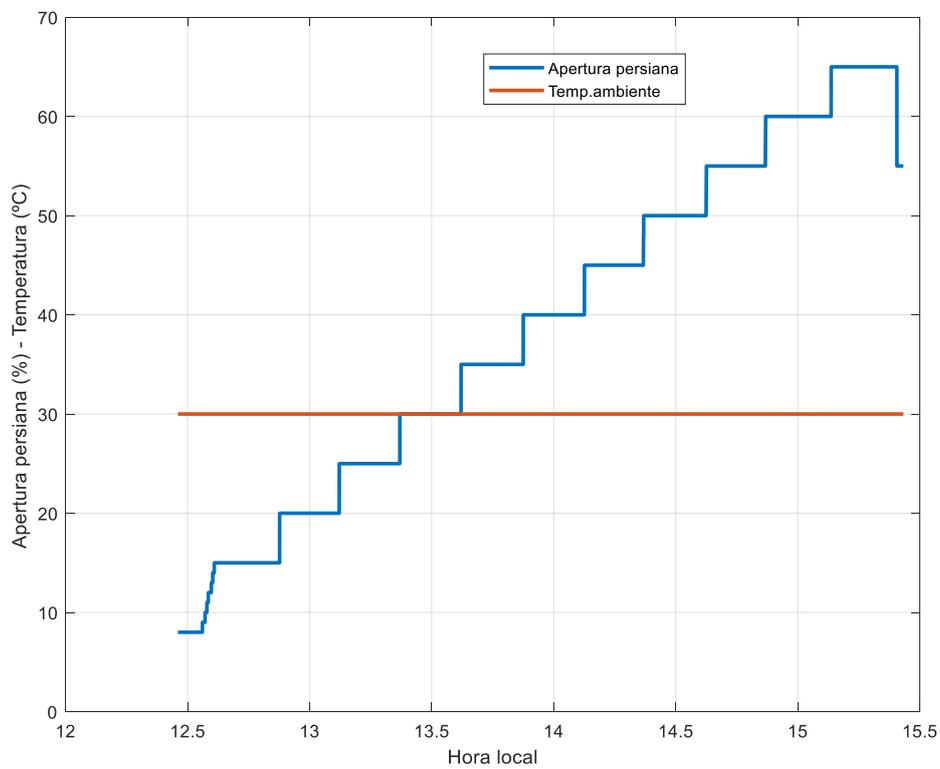


Figura 3.32. Calibración del modelo no lineal, muestra de cobre, 08/05/2012. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

El resultado de los parámetros finales estimados por el algoritmo genético de este trabajo es el siguiente:

$$\alpha_a = 0.03676; \quad \alpha_c = 24.3025; \quad \alpha_e = 1.0744;$$

Es evidente que la incertidumbre que absorben los parámetros es de tal magnitud que provoca que el parámetro α_e que modela la emisividad de la pieza es superior a 1, lo cual es físicamente imposible puesto que α_e es igual a 1 (caso límite) para un cuerpo negro. Sin embargo, como ocurría con otras muestras y como se ha venido comentando durante esta sección, a la hora de calibrar el modelo con el algoritmo genético, estos parámetros recogen toda esa incertidumbre que posee el modelo respecto de la realidad tratando de ajustar en la medida de lo posible la simulación al ensayo real.

Seguidamente, se procede calibrando con los datos del día 9 de mayo de 2012, cuya simulación con el resultado del algoritmo genético para los parámetros dados se muestra en la Figura 3.33 y Figura 3.34. El intervalo final impuesto por el usuario al algoritmo genético para los parámetros a calibrar es el mismo que en el ensayo anterior, con una población inicial de 200 individuos y un número total de 20 generaciones.

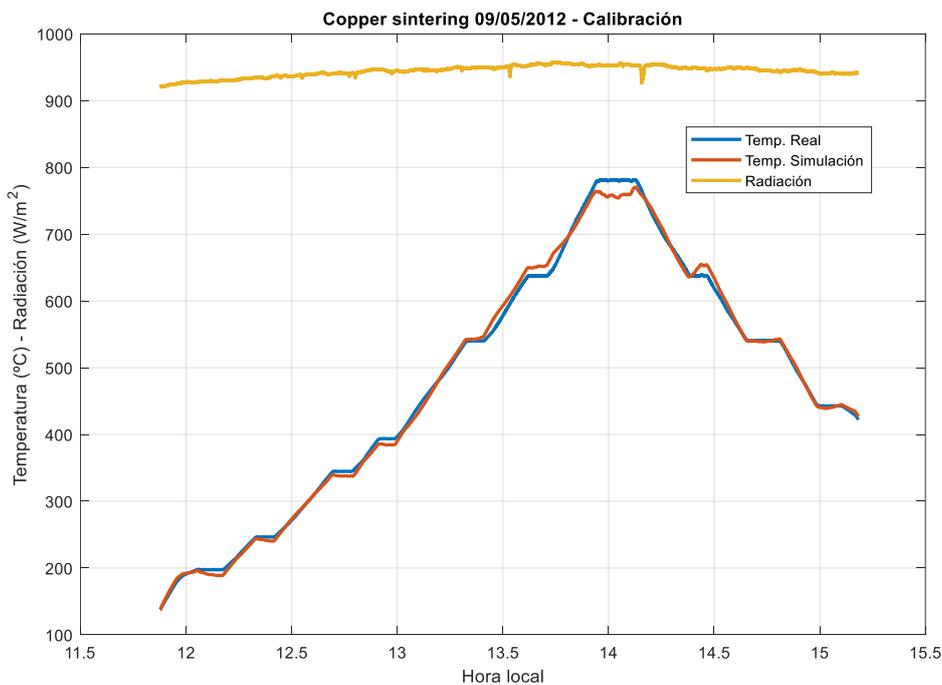


Figura 3.33. Calibración del modelo no lineal, muestra de cobre, 09/05/2012. Temperatura de la muestra y radiación solar.

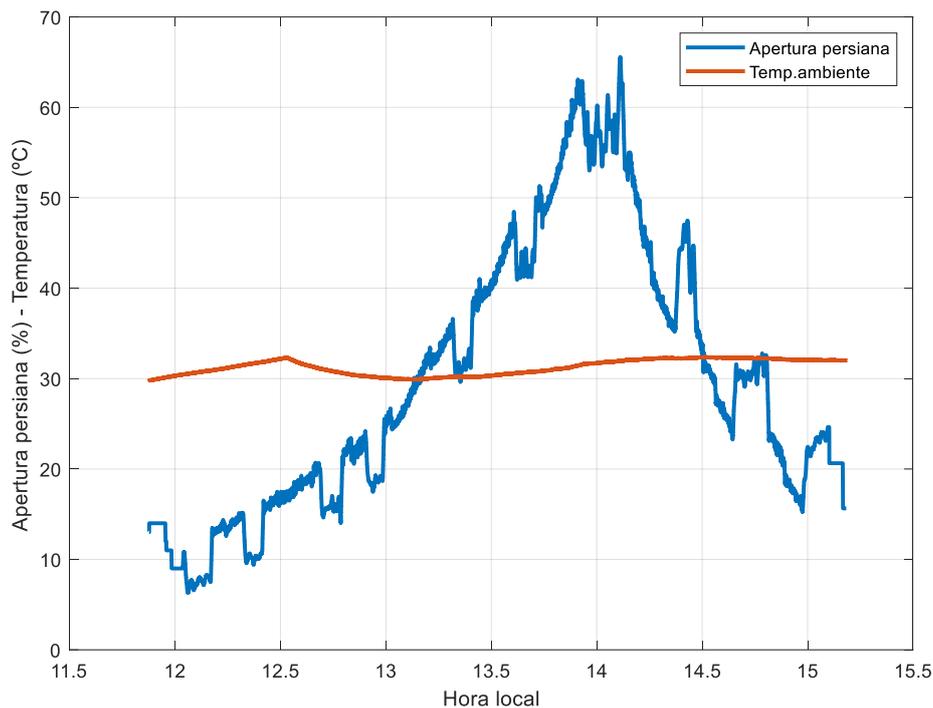


Figura 3.34. Calibración del modelo no lineal, muestra de cobre, 09/05/2012. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Este ensayo fue realizado en un día despejado (la señal de radiación se muestra constante), donde se trabajó en un rango de operación amplio de la muestra, lo que proporciona buena información para la calibración con el algoritmo genético. Se observa cómo la señal simulada tras la calibración se ajusta bien a la temperatura de ensayo real, excepto en torno a las 14 horas, tiempo alrededor del cual la señal simulada de la temperatura disminuye un poco en vez de seguir constante.

Por otra parte, la señal de entrada (porcentaje de apertura de la persiana) llega a sobrepasar el 60 %, que si se compara con las simulaciones con las otras muestras se puede ver que son valores altos de apertura de persiana, pese a tener valores de radiación parecidos, mientras que en los ensayos de zirconia blanca (ver Figura 3.19 y Figura 3.20) con valores en torno al 35 % de apertura de la persiana se alcanzan temperaturas en la muestra de ensayo de hasta 1200 °C; esto rápidamente demuestra la diferencia de la dinámica que presenta una muestra de ensayo a otra.

Los valores de los parámetros obtenidos de la calibración con los datos del día 9 de mayo de 2012 se muestran a continuación:

$$\alpha_a = 0.03627; \quad \alpha_c = 24.6508; \quad \alpha_e = 0.9811;$$

Observando los resultados, se evidencia como la emisividad α_e alcanza un valor muy cercano a 1, lo cual quiere decir que los parámetros están absorbiendo mucha incertidumbre que presenta el modelo no lineal para esta pieza, ya que una emisividad igual a 1 implicaría que se trata de un cuerpo negro. Sin embargo, se aprecia cómo los resultados obtenidos de calibrar el modelo con los datos del día 8 de mayo de 2012 y con

los datos del día 9 de mayo de 2012 proporcionan valores para los parámetros estimados por el algoritmo genético muy cercanos.

A continuación, se muestra en la Tabla 21 los valores de los parámetros estimados para la muestra de cobre, junto con los valores medios para ambos resultados de calibración que servirán para validar posteriormente el modelo no lineal para esta muestra.

Tabla 21. Parámetros obtenidos de calibrar el modelo no lineal para los distintos ensayos de la muestra de cobre.

Parámetros de la calibración, cables de cobre	α_a	α_c	α_e
08/05/2012	0.03676	24.3025	1.0744
09/05/2012	0.03627	24.6508	0.9811
Valor medio:	0.03652	24.4767	1.0278

Una vez fijados los parámetros medios que se utilizarán en el modelo no lineal para la muestra de cobre, se procede a validar el modelo con datos de días de ensayo dispuestos para ello en la Tabla 20, correspondientes a los días 10 y 11 de mayo. Al igual que ocurría con la muestra de acero A316-L, la diferencia entre los parámetros en las dos calibraciones realizadas es muy pequeño, dando como resultado que los valores medios de dichos parámetros sean muy cercanos a los de cada calibración por separado; es por esto que directamente se procede a validar la muestra con estos parámetros medios con los ensayos designados para ello, y no se van a utilizar los mismos datos de los ensayos utilizados para calibración para validar estos parámetros medios (el resultado será prácticamente igual).

Así, se procede a validar con los datos del día 10 de mayo de 2012, cuyos resultados se muestran a continuación en la Figura 3.35 y Figura 3.36. Se trata de un ensayo, muy parecido al del día 9 de mayo de 2012 que se utilizó para calibrar, en el cual la radiación se mantuvo prácticamente constante durante su duración, y donde se aplicaron cambios en la consigna de referencia de temperatura de la muestra del sistema de control, hasta llegar a 800 °C, para luego disminuir la temperatura de la misma manera. El ensayo es largo con una señal de control algo agresiva, deducción hecha a partir de las oscilaciones en la apertura de la persiana (ver Figura 3.36) y que acaban repercutiendo en pequeñas oscilaciones en la temperatura de la muestra (ver Figura 3.35).

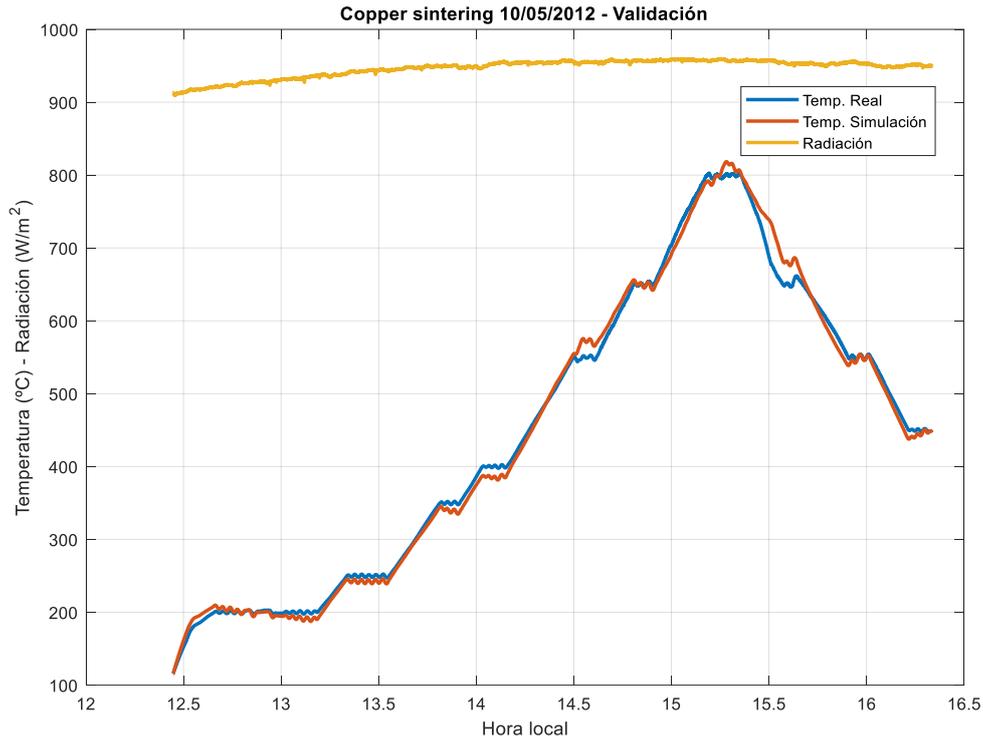


Figura 3.35. Validación muestra de cobre, ensayo del día 10/05/2012. Temperatura de la muestra y radiación solar.

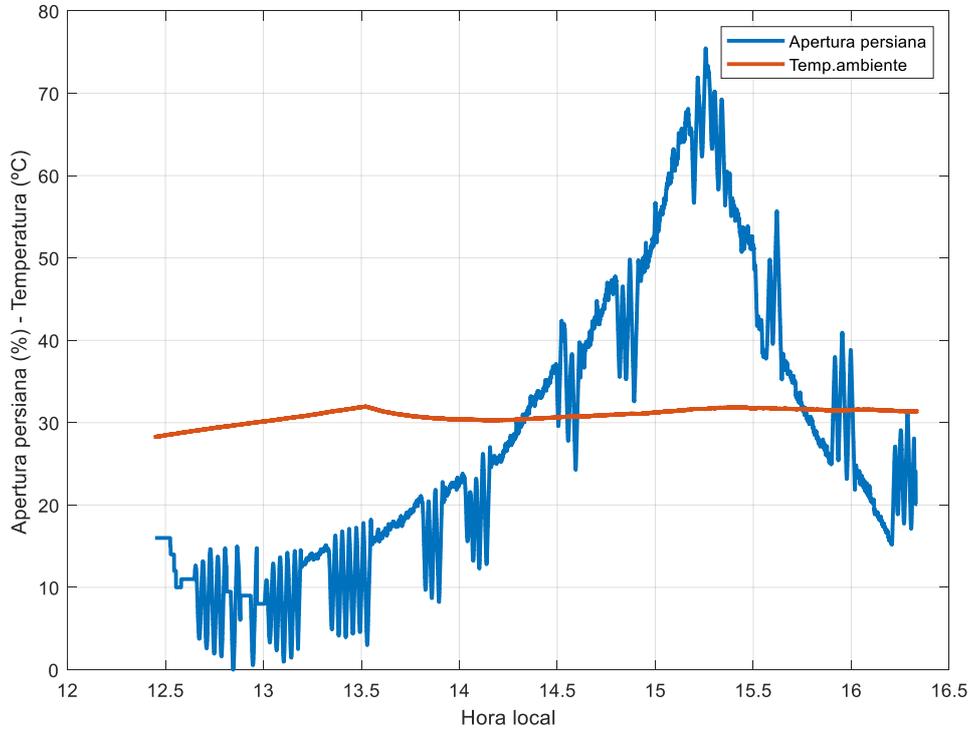


Figura 3.36 Validación muestra de cobre, ensayo del día 10/05/2012. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Claramente es apreciable que la diferencia entre la señal simulada y la del ensayo real es pequeña, por lo que los parámetros medios estimados por el algoritmo genético dan un

buen resultado para este ensayo. Posteriormente como se comentará, esto se verá reflejado en los índices de funcionamiento estudiados para esta validación.

Por último, se valida el modelo no lineal con los datos del día 11 de mayo de 2012; en esta simulación, cuyos resultados de validación se muestran en la Figura 3.37 y Figura 3.38, la radiación solar es prácticamente constante (excepto un poco antes de las 12 horas locales, donde se produce un pico descendente). Por su lado, la temperatura de la muestra simulada no se ajusta tan bien como en la validación anterior realizada para la muestra con los datos del ensayo del día 10 de mayo, pero aun así la diferencia no es muy grande y el modelo sigue la dinámica de la señal real, excepto a temperaturas de la muestra más altas donde el error entre la señal del ensayo real y la simulada se hace más pronunciada.

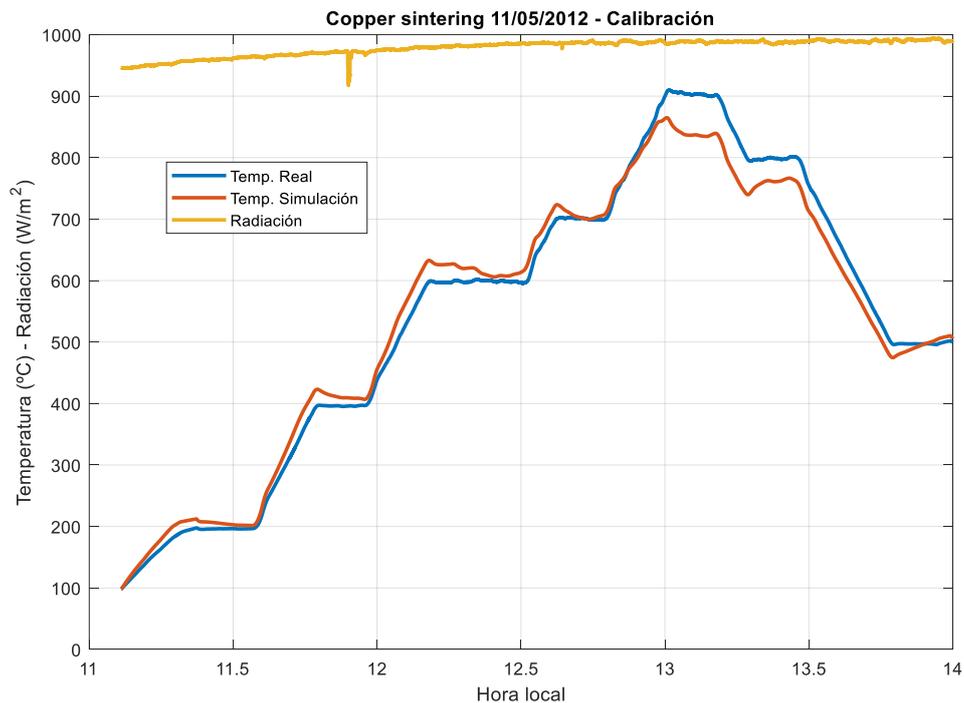


Figura 3.37. Validación muestra de cobre, ensayo del día 11/05/2012. Temperatura de la muestra y radiación solar.

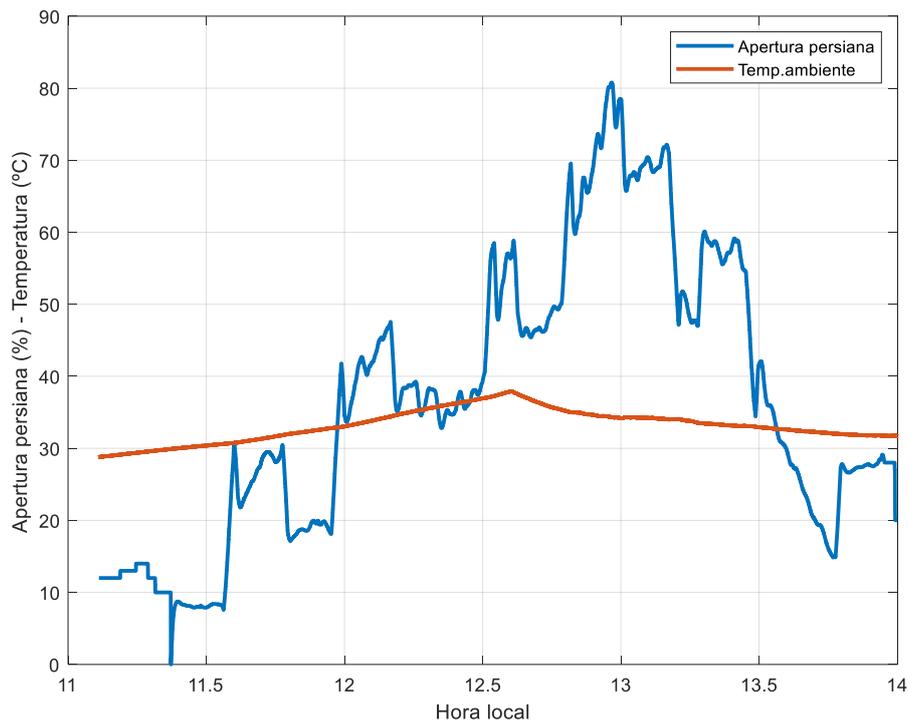


Figura 3.38. Validación muestra de cobre, ensayo del día 11/05/2012. Apertura de persiana y temperatura ambiente.

Finalmente, a continuación se muestran los resultados de aplicar los índices de funcionamientos a los ensayos utilizados para validar el modelo no lineal para la muestra de cobre, y que nos dan información cuantitativa respecto a calidad del ajuste que posee el modelo no lineal con la pieza real. Estos índices se muestran en la Tabla 22:

Tabla 22. Índices de funcionamiento del modelo no lineal para el sinterizado de cobre en los distintos ensayos de validación.

	Validación n°1, 10/05/2012 (ver Figura 3.35 y Figura 3.36)	Validación n°2, 11/05/2012 (ver Figura 3.37 y Figura 3.38)
Error máximo absoluto (°C)	56.1863	68.6431
Error medio absoluto (°C)	9.3607	23.9282
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	12.3108	29.6862
R ²	0.9962	0.9835

Del análisis de estos resultados de los índices de funcionamiento se extraen a continuación distintas conclusiones:

- La primera, que en ambas validaciones hay cierto momento en el cual el error absoluto de temperatura de la muestra (real menos simulada) llega a alcanzar valores altos, de en torno a 60 °C (casi 70 °C para la validación nº 2). Sin embargo, esto se trata de valores de error (en términos absolutos) puntuales. Para la validación nº1, ese error probablemente se esté dando en torno a las 15.50 hora local, y si se trata de un valor puntual pues luego el error decrece rápidamente; sin embargo, para la validación nº2, el error máximo absoluto probablemente se da en la franja horaria entre la 13 y 13.50 hora local donde la temperatura del ensayo alcanza sus valores máximos, y este error se mantiene un buen periodo de tiempo. Esta última conclusión quiere decir que, para dicho ensayo (día 11 de mayo de 2012), el modelo con los parámetros estimados no está recogiendo bien la dinámica de la pieza real cuando la temperatura es más alta.
- La segunda conclusión es la que proporciona los índices del error medio absoluto y el RMSE, que para la validación nº1 ofrece valores muy bajos, en torno a los 10 °C, lo cual es un resultado muy bueno, mientras que para la validación nº2 los resultados que se obtienen son algo más altos, entre los 20 °C y 30 °C para el error medio absoluto y el RMSE, respectivamente; en el caso de esta segunda validación con los datos del día 11 de mayo, estos valores altos están influenciados en parte por la primera conclusión expuesta con anterioridad donde se comentó que en una franja de media hora del ensayo (entre la 13 y 13.50 hora local) el error es muy grande y prácticamente constante, haciendo que se “inflen” los valores de los índices del error medio absoluto y el RMSE respecto de los otros valores que por lo general son bastante más bajos durante el ensayo. Por tanto, se puede concluir con que la muestra presenta buenos resultados de los índices de funcionamiento para ambas validaciones, aunque claramente algo peor en la segunda.
- La tercera conclusión, en base al valor del índice R^2 , es que ambas validaciones obtienen valores muy altos de este índice, lo que implica que la dinámica del modelo no lineal se asemeja mucho a la del ensayo real.
- La cuarta y última conclusión está referida a la validación nº2 (ya que la primera validación se puede considerar que los resultados de los índices son muy buenos), y es que en este ensayo del día 11 de mayo es muy probable que la pieza durante este ensayo no presentara las mismas condiciones experimentales que los demás, ocurriendo, por ejemplo, que ésta haya sufrido los efectos del proceso de sinterizado tras los días de simulación anteriores y por tanto su comportamiento es distinto dado que sus propiedades han cambiado tras el tratamiento. Esto influye en consecuencia en los parámetros estimados que, mientras que en las otras 3 simulaciones los resultados son muy ajustados, en esta simulación con los datos del día 11 de mayo, pese a ser un ensayo muy parecido a los otros 3, se obtienen resultados de los índices de funcionamiento algo distintos.

Finalmente, se considera el modelo no lineal validado para esta muestra de ensayo.

3.1.4 Carburo de silicio

Para terminar con las calibraciones de las distintas muestras de ensayo, el último material que se trata en este TFM es el carburo de silicio. Tal y como se ha expuesto con los anteriores materiales, a continuación se muestra en la Tabla 23 para el carburo de silicio

la dependencia del calor específico de este material con la temperatura del propio material, según [6]. Los valores de la tabla proceden de un paso previo de cálculo en una hoja de datos siendo, en el caso de la columna de temperatura, de una conversión de Kelvin a °C; y en el caso del calor específico, de una conversión de (J/(mol·K)) a (J/(Kg·K)) (sabiendo que la masa molar del SiC es de 40.0962 g/mol).

Tabla 23. Dependencia del calor específico con la temperatura para la muestra de carburo de silicio, según [6].

Temperatura de la muestra de carburo de silicio (°C)	Calor específico (J/(Kg·K))
25	667
227	962
427	1097
627	1176
827	1229
1027	1268
1327	1309
1727	1350

Para llevar a cabo la calibración se hará uso de los pocos datos de distintos días de ensayo que se tienen disponibles, correspondientes al 30 de julio de 1996, al 07 de julio de 1998 y al 22 de julio de 1998. Se recoge a continuación en la Tabla 24 la clasificación de los días ensayo disponibles según sean para calibrar el modelo no lineal o para validarlo, donde se aprecia que se escoge 2 días de ensayo distintos para calibrar el modelo y un día de ensayo completo para validarlo. La razón por la que se ha seguido esta metodología para el carburo de silicio es que, dados los días disponibles de ensayo, se ha preferido “enriquecer” la calibración con dos días de ensayo distintos (los cuales como se verá a continuación recogen mucha información del rango de operación de la muestra) y sobre los resultados obtenidos, se usará como resultado final el valor medio del resultado de las dos calibraciones por separado, teniendo en cuenta así ambas. Además, se validarán estos parámetros medios sobre estos mismos ensayos también debido a la discrepancia entre los parámetros que se obtienen del algoritmo genético por separado a los que se obtienen como resultado del valor medio comentado.

Tabla 24. Clasificación de los datos de la muestra de carburo de silicio en calibración o validación.

Datos de la pieza de ensayo (Carburo de silicio)	Uso de los datos
30 de julio de 1996	Calibración
07 de julio de 1998	Calibración
22 de julio de 1998	Validación

Para asegurar que la calibración es lo más correcta posible, la estrategia seguida ha sido, como con las demás muestras, utilizar los datos del ensayo que mayor rango de operación abarquen. Debido a ello, a continuación se muestra la calibración con los datos del día 30 de julio de 1996 en la Figura 3.39 y Figura 3.40, donde para valores de radiación en torno a 700-800 W/m² (valores algo variables, probablemente no fue un día completamente

despejado), probablemente se aplicó un tren de cambios de consigna en la referencia en forma de escalón, con un controlador que proporcionaba una señal de control agresiva (ver Figura 3.40). Otro factor que destacar de este ensayo es que se desconoce la medida de la temperatura ambiente durante el mismo, por lo que se ha supuesto a 25 °C igual que en anteriores días de ensayo con las demás piezas.

Analizando en resultado de la calibración para el día 30 de julio de 1996, se aprecia como a baja temperatura de la muestra, el modelo no lineal sobreoscila ante esa entrada en forma de pico pronunciado en la apertura de la persiana, mientras que a más alta temperatura este fenómeno desaparece, teniendo una respuesta más sobreamortiguada.

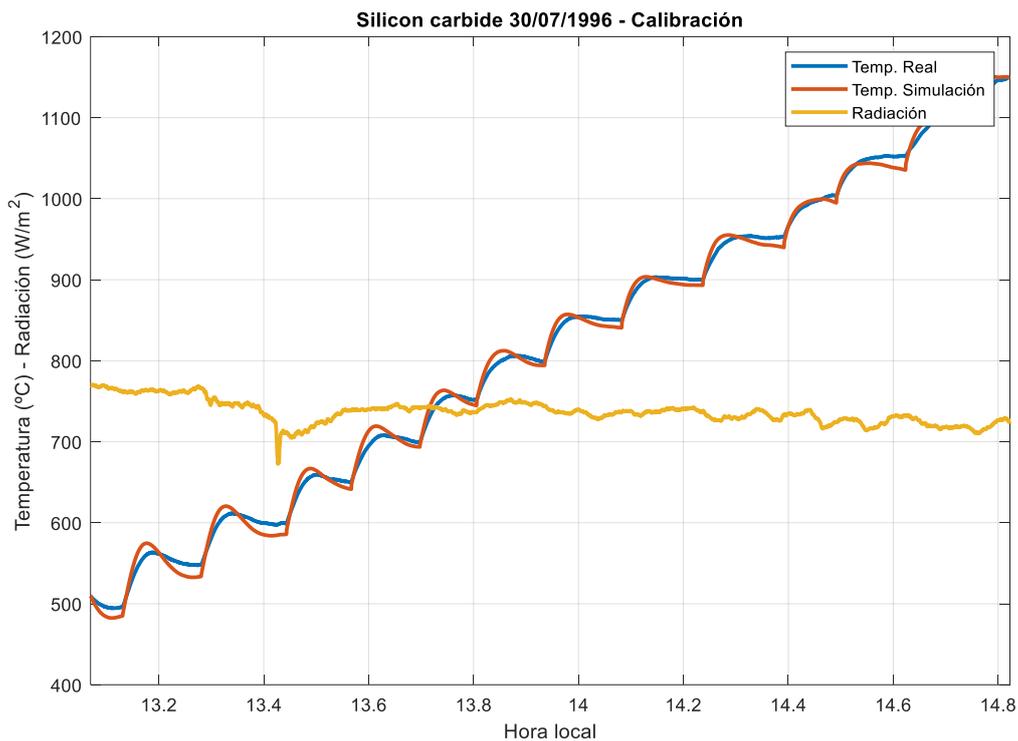


Figura 3.39. Calibración del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 30/07/1996. Temperatura de la muestra y radiación solar.

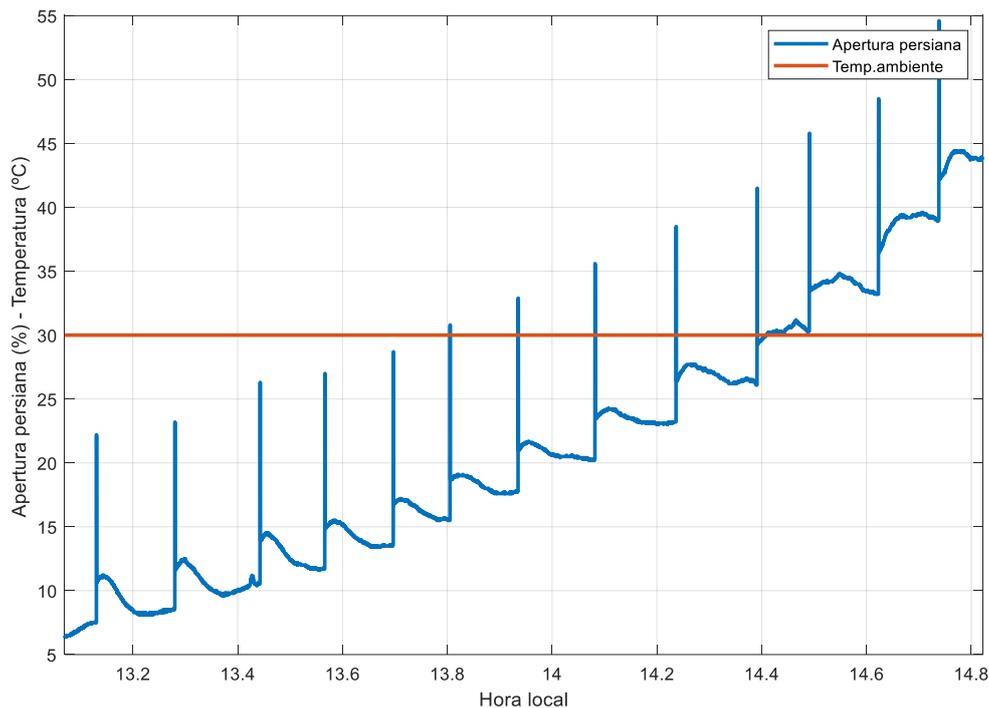


Figura 3.40. Calibración del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 30/07/1996. Apertura de la persiana y radiación solar.

Finalmente, tras calibrar el modelo con el algoritmo genético, éste proporciona los siguientes valores para los parámetros:

$$\alpha_a = 0.1319; \quad \alpha_c = 19.7019; \quad \alpha_e = 0.5140;$$

El siguiente día de ensayo que se utiliza para calibrar el es día 07 de julio de 1998, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.41 y Figura 3.42. En este ensayo se aplicaron distintos pulsos en el porcentaje de apertura de la persiana midiendo la reacción en la temperatura de la muestra de carburo de silicio, correspondiente a la salida del modelo. Estos pulsos fueron de gran amplitud, alcanzando hasta el 70 % de apertura de la persiana. Por otra parte, destacar que la radiación es prácticamente constante excepto a las 15.40 horas donde la señal medida de la radiación sufre un descenso pronunciado en forma de pico. Por último, dado que los datos del ensayo no contenían datos de la temperatura ambiente, en la simulación se ha supuesto ésta de 25 °C.

Como puede apreciarse tras observar la Figura 3.41, el ajuste entre la señal simulada y la real del ensayo es muy bueno al principio, antes de dar los 3 pulsos finales, es decir, antes de las 15.35 horas; luego tras los pulsos la señal de la temperatura simulada se aleja de la señal real en varias zonas, aunque sigue teniendo la misma dinámica.

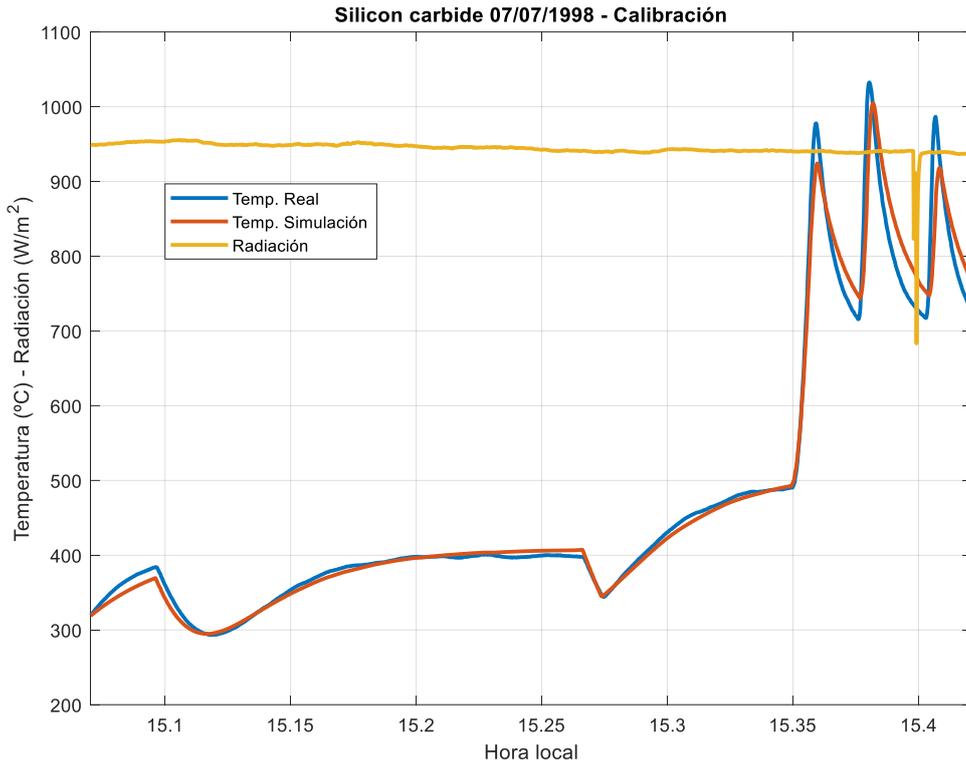


Figura 3.41. Calibración del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 07/07/1996. Temperatura de la muestra y radiación solar.

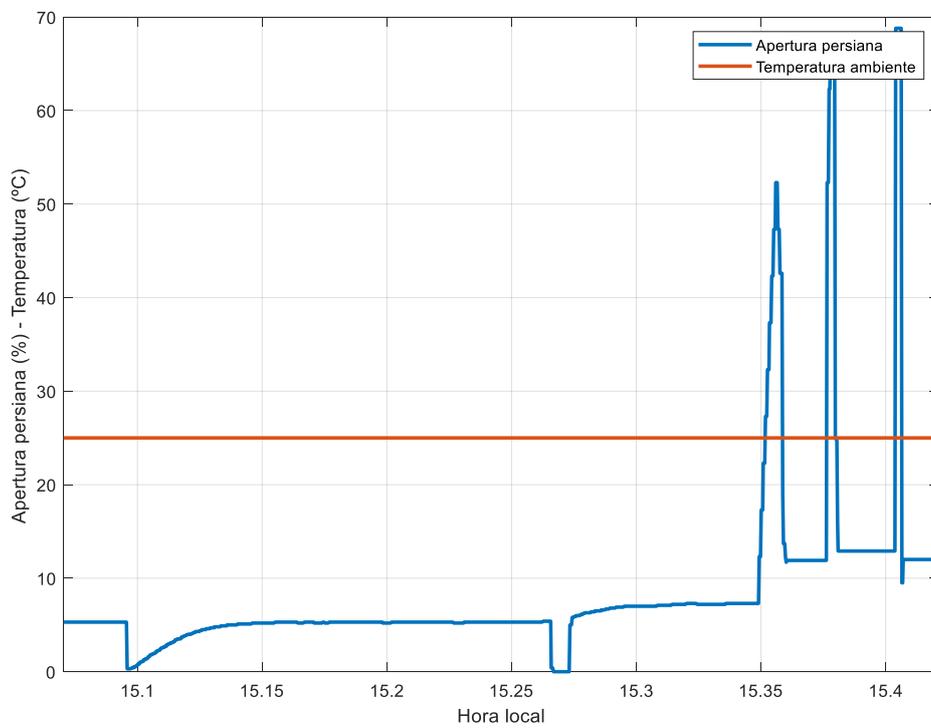


Figura 3.42. Calibración del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 07/07/1998. Apertura de la persiana y radiación solar.

Los parámetros obtenidos tras la calibración con los datos del día 7 de julio de 1998 se muestran a continuación:

$$\alpha_a = 0.1821; \quad \alpha_c = 29.8525; \quad \alpha_e = 0.9431;$$

Es notoria la diferencia que existe entre los parámetros calibrados, sobre todo en la emisividad. Esta diferencia obtenida en las dos calibraciones distintas puede deberse, en gran medida, a las condiciones experimentales que se dan en el horno, que probablemente no fueron las mismas. En este tipo de ensayos donde se realizan muchos ensayos con una misma pieza o muestra, es posible que estos ensayos en los cuales se le imponen temperaturas mayores incluso a los 1000 °C las propiedades de las muestras cambien, al igual que ocurría con el proceso de sinterizado con el cobre. Además, estos parámetros, como se ha repetido durante todo el trabajo, absorben la incertidumbre que presenta el modelo no lineal para poder alcanzar un ajuste óptimo entre la señal de la temperatura real y la señal simulada por el modelo.

Finalmente, en la Tabla 25 se recogen los resultados obtenidos de las distintas calibraciones con el algoritmo genético, y en la última fila de la tabla se muestra calculado el valor medio para cada parámetro. Estos valores medios serán los utilizados para validar el modelo con los datos de los días ensayo, incluyendo también los propios ensayos que se utilizaron para calibrar la muestra (dado que el valor de la emisividad varía entre una simulación y otra, y así lo hace también por tanto en gran amplitud el valor medio calculado, se validarán sobre los mismos ensayos usados para calibrar los parámetros medios obtenidos de dichas calibraciones con el algoritmo genético).

Tabla 25. Parámetros obtenidos de calibrar el modelo no lineal para los distintos ensayos de la muestra de carburo de silicio.

Parámetros de la calibración, carburo de silicio	α_a	α_c	α_e
30/07/1996	0.1319	19.7019	0.5140
07/07/1998	0.1821	29.8525	0.9431
Valor medio:	0.1570	24.7772	0.7286

El siguiente paso será mostrar las distintas validaciones que se han realizado para los parámetros medios obtenidos en las 2 calibraciones anteriores. Primeramente, se comienza validando el modelo no lineal con los 2 ensayos que se utilizaron para calibrar, y luego se terminará mostrando la validación con el ensayo del día de ensayo 22 de julio de 1998 (ensayo designado para ello, ver Tabla 24). Finalmente, se calcularán los índices de funcionamiento para las 3 validaciones.

En primer lugar, se muestra el resultado de validar el modelo no lineal con los parámetros medios para el ensayo del día 30 de julio de 1996; como puede observarse, la diferencia entre los parámetros medios y el que se obtuvo individualmente tras calibrar el modelo no lineal hace que la diferencia entre la temperatura de la muestra real y la simulada se incremente bastante. Estos resultados tendrán una influencia considerable en el cálculo de los índices de funcionamiento tal y como se verá al final del apartado.

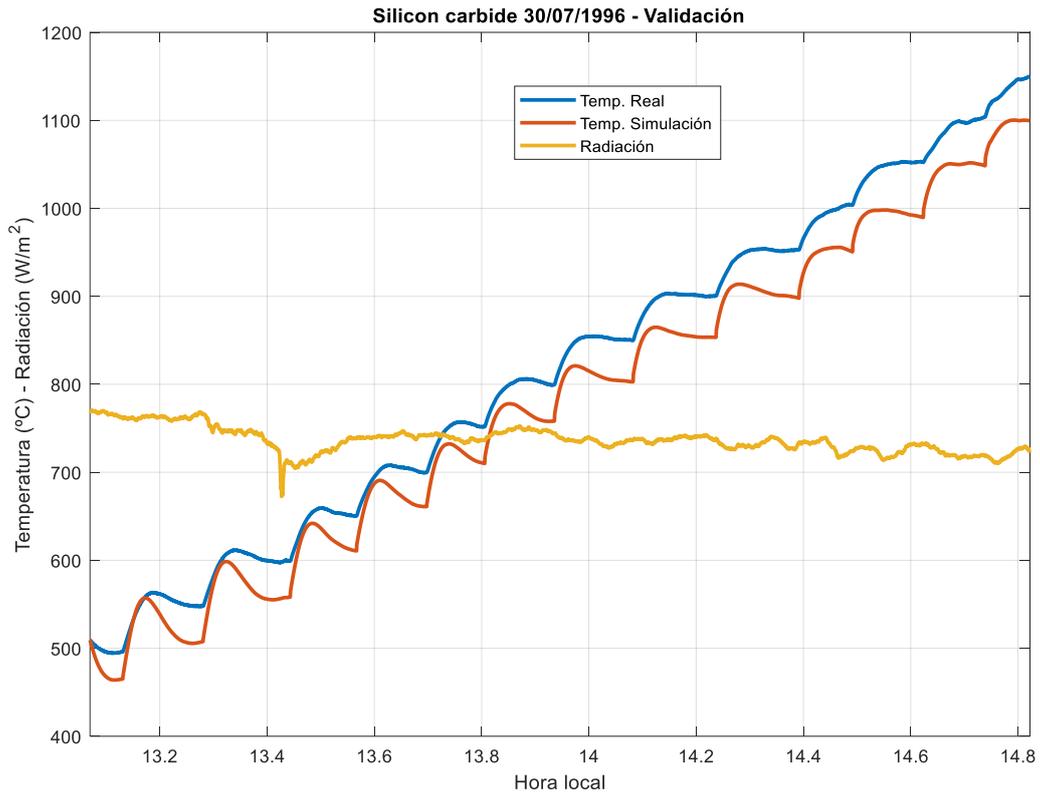


Figura 3.43. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 30/07/1996. Temperatura de la muestra y radiación solar.

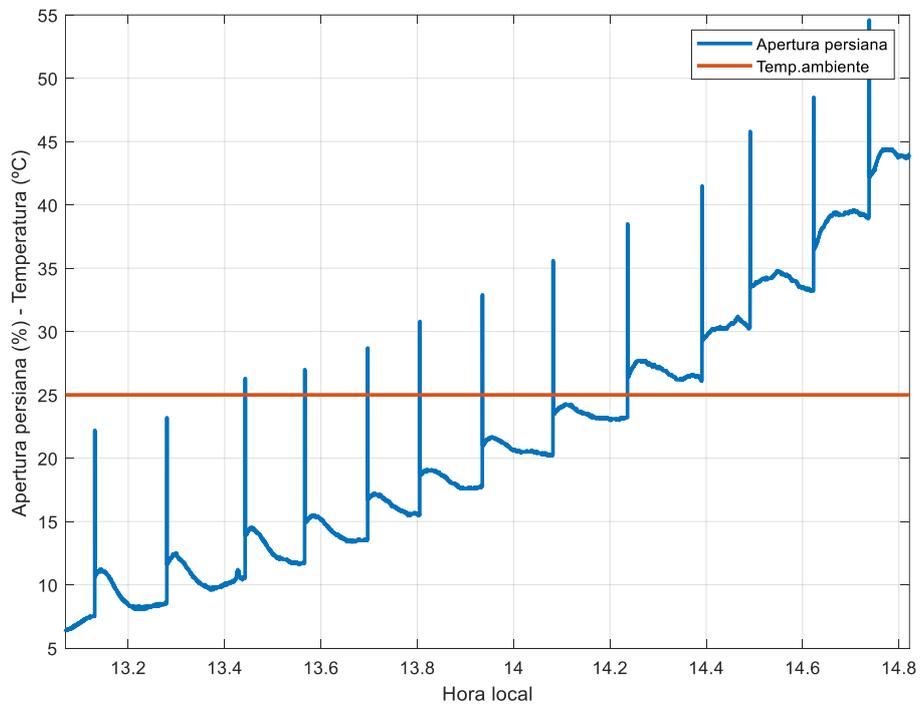


Figura 3.44. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 30/07/1998. Apertura de la persiana y radiación solar.

Seguidamente, se valida el modelo con los datos del día 7 de julio de 1998 (día que se usó para calibrar) tal y como se muestra en la Figura 3.45 y la Figura 3.46. Como puede comprobarse, al igual que ha ocurría con la validación anterior del día 30 de julio de 1996, el resultado empeora tras utilizar los parámetros medios de la Tabla 25 en comparación con el resultado tras aplicar el algoritmo genético por separado en este ensayo para calibrar el modelo (recordar Figura 3.41 y Figura 3.42)

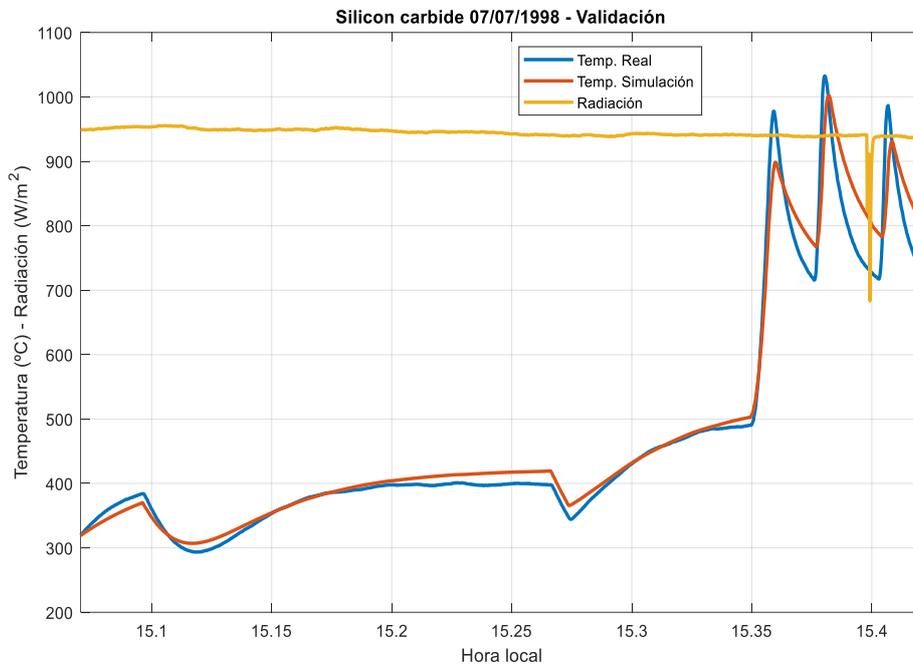


Figura 3.45. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 07/07/1996. Temperatura de la muestra y radiación solar.

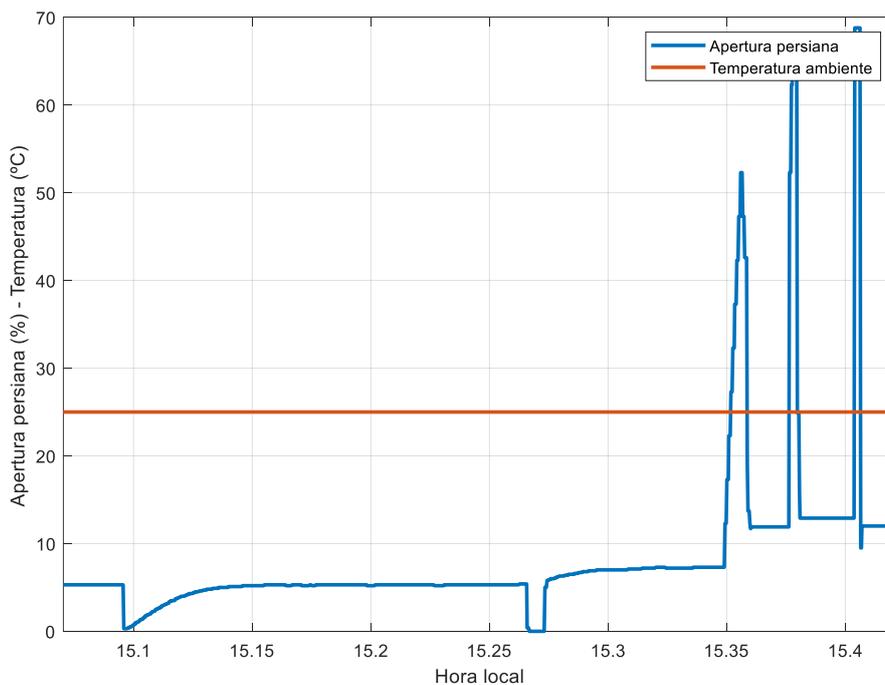


Figura 3.46. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 07/07/1998. Temperatura de la muestra y radiación solar.

Una vez se ha validado el modelo para los mismos días para los que se utilizó el algoritmo genético por separado para calibrar el modelo, se procede a validar el modelo con el día designado para ello en la Tabla 25, correspondiente al día 22 de julio de 1998. El resultado se muestra en la Figura 3.47 y en la Figura 3.48, donde puede comprobarse que el ensayo fue durante un día sin nubes, con una radiación en torno a valores algo superiores a los 800 W/m^2 , y con una temperatura ambiente que ha sido supuesta de 25 °C debido a la falta de datos sobre esta entrada al modelo no lineal.

Es notable que validación es muy ajustada hasta un poco después de las 16 horas donde la temperatura simulada no es capaz de alcanzar los 900 °C tal y como si que hace la temperatura del ensayo real tras el que parece un cambio de consigna en la referencia de control en forma de escalón; después, dado el error en estacionario que se produce entre la señal real y la simulada de la temperatura de la muestra, tras producirse el que parece un segundo cambio de consigna en la referencia en forma de escalón hasta los 700 °C de nuevo, la señal simulada queda por debajo de la señal del ensayo real. Esto claramente se verá reflejado en los índices de funcionamiento que se muestran detrás de las figuras, en la Tabla 26.

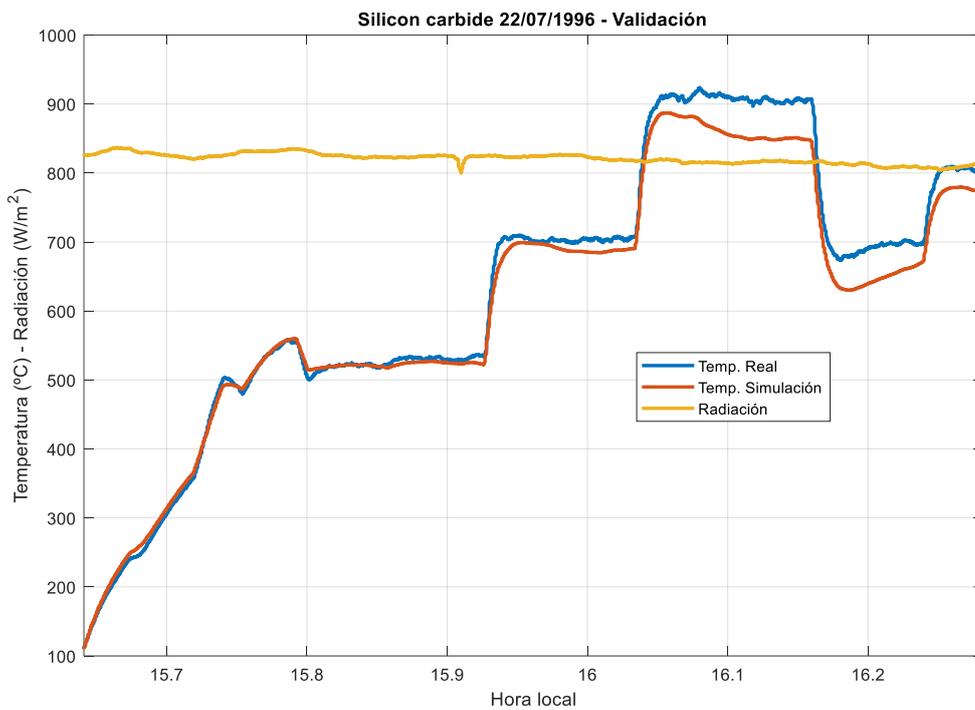


Figura 3.47. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 22/07/1998. Apertura de la persiana y radiación solar.

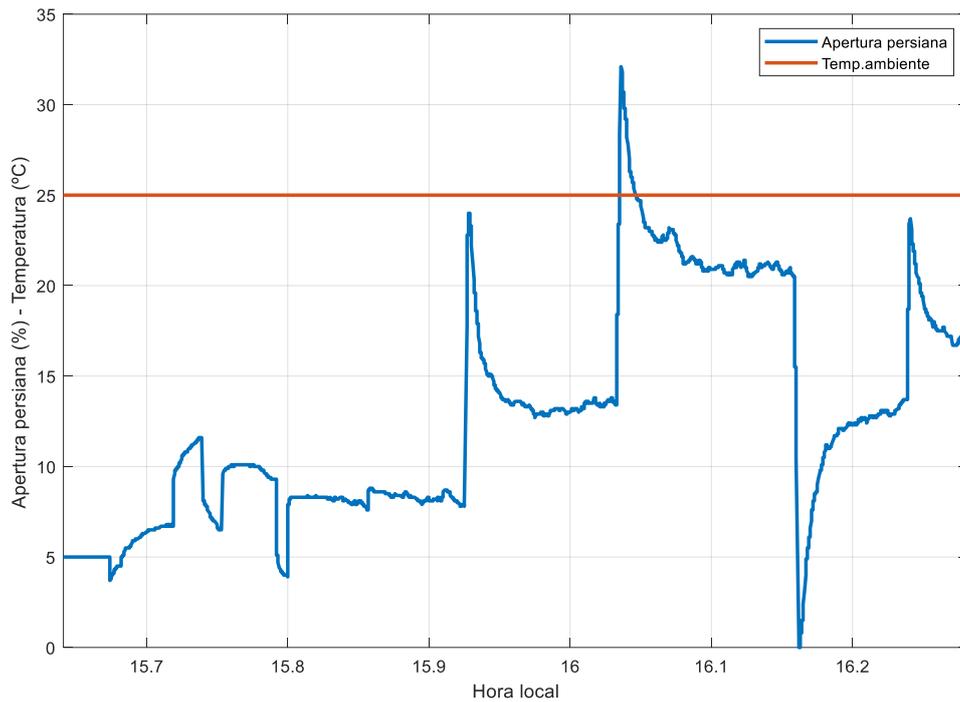


Figura 3.48. Validación del modelo no lineal, muestra de carburo de silicio, 22/07/1998. Apertura de la persiana y radiación solar.

Finalmente, se muestran en la Tabla 26 los índices de funcionamiento que evalúan de forma cuantitativa la calidad de las distintas validaciones realizadas para la muestra de carburo de silicio.

Tabla 26. Índices de funcionamiento del modelo no lineal para el carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.

	Validación 1, 30/07/1996 (ver Figura 3.43 y Figura 3.44)	Validación 2, 07/07/1998 (ver Figura 3.45 y Figura 3.46)	Validación 3, 22/07/1998 (ver Figura 3.47 y Figura 3.48)
Error máximo absoluto (°C)	63.1042	131.0694	64.3218
Error medio absoluto (°C)	35.0609	18.7881	20.6781
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	37.5134	30.1423	27.8419
R ²	0.9599	0.9717	0.9812

Tras calcular los índices de funcionamiento en la Tabla 26, se realizan las siguientes afirmaciones:

- La validación n° 2, correspondiente al día 7 de julio de 1998, es de todas las validaciones realizadas para la muestra de carburo de silicio, la que mayor error máximo absoluto presenta, de 131.07 °C; sin embargo, también es la que menor error medio absoluto presenta también de todas. Esto se debe a que, en esta simulación, gran parte del error está situado en una parte pequeña del tiempo de simulación, consiguiendo que pese a que el error que se produce es muy grande en ese período, dado que el período en sí es pequeño, el error medio se ve compensado ya que en el resto de la simulación es muy pequeño. Por otro lado, se observa un valor muy parecido de error máximo absoluto para la validación n° 1 y n° 2, aunque el mayor error medio se da en la primera, lo cual es lógico una vez se observa el resultado de la validación del día 30 de julio de 1996 donde se arrastra un error constante entre la señal real y simulada.
- Observando el resultado de R^2 se entiende que las tres validaciones siguen la dinámica del ensayo real dado los valores, superando las 3 el valor del 95 %.
- Respecto a la raíz cuadrada del error cuadrático medio, se observa que todas las validaciones obtienen valores dentro de los límites aceptables (menor a 40 °C), y también que la validación n° 3 es la que mejor índice ofrece, lo cual es sorprendente dado que es el ensayo que no ha sido incluido en el proceso de calibración, por lo que es ajeno a los parámetros medios de α_a , α_c y α_e utilizados. Además, esta validación del día 22 de julio de 1998 posee también el R^2 más alto, lo cual puede indicar que en general es la que mejor resultados ofrece.

3.1.5 Resumen de calibración: valores finales de los parámetros estimados.

En este punto se resumen los valores de α_a , α_c y α_e calculados y validados para cada uno de los ensayos durante este apartado del presente trabajo. Estos valores comentados se recogen en la Tabla 27 para cada muestra de ensayo estudiada en el presente trabajo.

Tabla 27. Resumen de los valores obtenidos de las distintas calibraciones para las distintas muestras, ya calibrados.

	α_a	α_c	α_e
Acero A316-L	0.4776	41.395	0.9002
Zirconia blanca	0.2719	47.340	0.2234
Sinterizado de cobre	0.03652	24.4767	1.0278
Carburo de silicio	0.1570	24.7772	0.7286

Con los valores obtenidos por algoritmo genético y validados posteriormente, cada una de las muestras de ensayo tratadas durante este trabajo tienen todas sus variables y parámetros establecidos finalmente para poder dar el siguiente paso, que es el de obtener modelos lineales para cada muestra que permita realizar lazos de control con ellos y poder así obtener un control en todo el rango de operación para cada muestra.

3.2 Validación del modelo lineal

Dado que ya se poseen valores definitivos de los parámetros estimados para cada una de las muestras, se procederá a estudiar cómo varían los valores de la temperatura de la pieza

en estado estacionario en función de la apertura de la persiana y de la radiación solar. Posteriormente, dado que se pretende obtener modelos lineales a partir de ganancia y constante de tiempo para distintos puntos de operación, se mostrará la dependencia de estos parámetros característicos de un modelo lineal de primer orden con las dos entradas al modelo comentadas anteriormente, la apertura de la persiana y la radiación solar. Todo este proceso se llevará a cabo según la muestra que se estudie, obteniendo varios modelos que cubran lo mejor posible el rango de operación.

En consiguiente, se estudiará a continuación para cada muestra los valores en estado estacionario de la temperatura respecto de la apertura de la persiana y de la radiación, obteniendo a su vez ganancia y constante de tiempo del modelo lineal de primer orden según las ecuaciones (2.22) y (2.24), que definen la ganancia respecto de la apertura de la persiana y la constante de tiempo del modelo lineal.

3.2.1 Acero A316L

A continuación, se resumen en la Tabla 28 los valores de los parámetros que conforman el modelo no lineal para la muestra de acero A316L:

Tabla 28. Resumen de los parámetros característicos de la muestra de acero A316L que conforman el modelo.

Parámetros característicos de la muestra de acero A316L	Valor	Unidades
m_s	0.1	Kg
c_s (a 25 °C)	502	J/(Kg·K)
S_s	0.01	m ²
α_a	0.4776	-
α_c	41.395	W/(m ² ·K ⁴)
α_e	0.9002	-

Nótese de la Tabla 28 que el valor que se muestra para el calor específico de es de 502 J/(Kg·K), siendo este el valor a 25 °C; sin embargo, se hace conocer al lector que el valor utilizado para calcular el modelo lineal es de 514 J/(kg·K), correspondiente a 200 °C (ver Tabla 11, donde se expuso la dependencia del calor específico con la temperatura de la muestra), ya que se ha considerado que a 25 °C es un valor de temperatura de la muestra al que prácticamente no se trabajará, y que además a la hora de trabajar con el modelo lineal simplifica el cálculo el uso de un valor fijo de calor específico. Esto claramente añadirá una incertidumbre extra al modelo lineal respecto del modelo no lineal, pero se considera asumible debido a que afecta solamente a la constante de tiempo (ver ecuación (2.22)) y a que simplifica bastante el cálculo del punto de operación y el diseño del modelo lineal el considerar el calor específico un valor estático.

Dado que se conocen y fijan todos los valores conocidos de los parámetros dependientes de la muestra de ensayo, se procede a evaluar, según la ecuación (2.19) resultante de

aplicar la condición de estado estacionario (condición que iguala a 0 las derivadas respecto del tiempo), la dependencia que muestra la temperatura de la muestra respecto de la apertura de la persiana y de la radiación solar.

Para este estudio, se ha considerado la temperatura ambiente como un valor fijo de 25 °C. A continuación, se muestra en la Figura 3.49 una gráfica en 3 dimensiones en los cuales, los ejes X e Y son la apertura de la persiana y la radiación, respectivamente, mientras que el eje Z vertical corresponde a la temperatura de la muestra de ensayo, calculada según la ecuación (2.19) para el modelo en estado estacionario. Este estudio permitirá observar de forma clara la no linealidad respecto del punto de operación del modelo. Este resultado se muestra a continuación en la Figura 3.49, donde se muestra:

- En el eje derecho la apertura de la persiana, para valores de 0 a 100 %, muestreados de 1% en 1 %;
- En el eje izquierdo, la radiación solar, para valores de 500 W/m² a 1100 W/m², muestreado de 6 W/m² en 6 W/m²;
- En el eje superior o eje Z se muestra el valor en estacionario de la temperatura de la muestra de ensayo.

Se aclara que la radiación solar se escoge en ese rango de operación (de 500 a 1100 W/m²) ya que en el horno no se suele operar bajo radiaciones menores a 500 W/m² y por otra parte tampoco se dan radiaciones superiores a 1100 W/m².

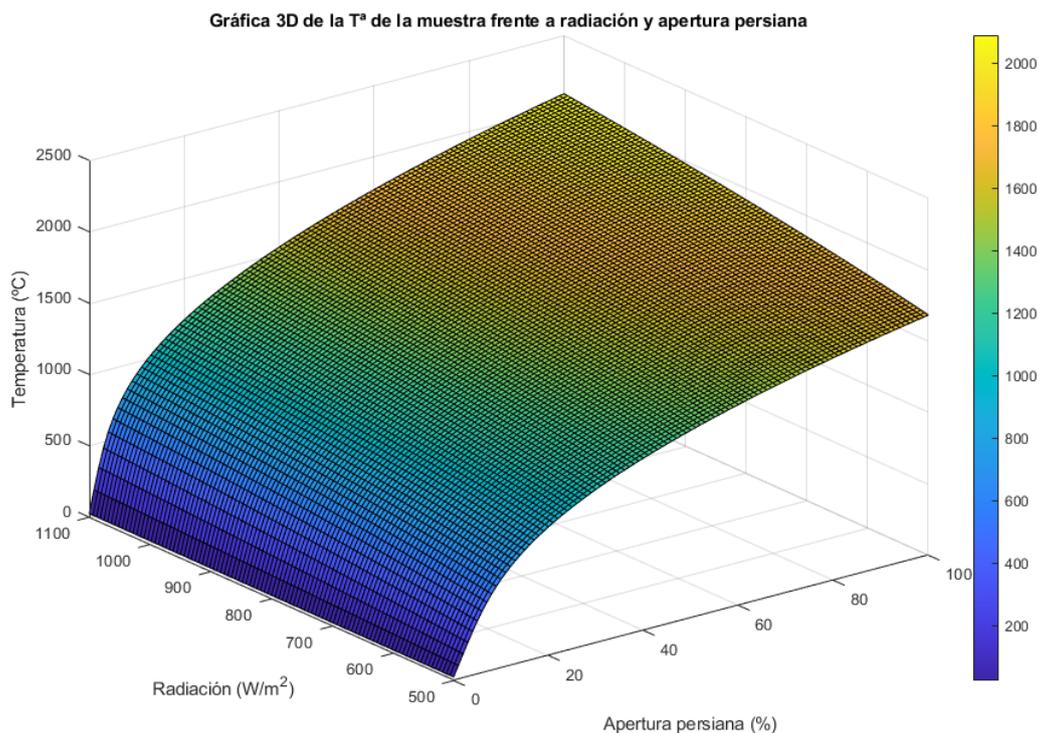


Figura 3.49. Gráfica en 3 dimensiones de la T^a de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de acero A316-L

Tal y como se observa en la anterior figura, la temperatura de la muestra es muy dependiente del punto de operación en cada momento. Se observa cómo la no linealidad es mucho más pronunciada en valores de apertura de persiana pequeños (las líneas tienen

mayor pendiente) mientras que a aperturas de persiana mayores la temperatura aumenta de forma más lineal. Sin embargo, la mejor forma de visualizar la no linealidad es representando de igual manera la constante de tiempo y la ganancia del modelo lineal con una gráfica en 3 dimensiones. Esto es lo que se hace a continuación, analizando cómo la ganancia y la constante de tiempo del modelo lineal varían de igual manera con el punto de operación definido por la apertura de la persiana y por la radiación solar. Este análisis proporcionará la información necesaria para dividir el rango de operación en distintos intervalos y poder diseñar un modelo de primer orden para cada uno de ellos, siendo así posible posteriormente diseñar una estrategia de control que abarque todo el rango de operación.

Así, se muestra a continuación en la Figura 3.50, la dependencia de la constante de tiempo para la muestra de acero con el punto de operación definido por la radiación y la apertura de la persiana (considerando la temperatura ambiente constante a 25 °C). Si se analiza el valor de la constante de tiempo en la dimensión de la apertura de persiana, se observa como la constante de tiempo varía de una forma muy pronunciada cuándo ésta posee valores bajos, mientras que a partir de un valor del 40 % aproximadamente de apertura de persiana, la constante de tiempo apenas varía (se aprecia sobre todo en el cambio de colores, que tal y como indica la barra que aparece al lado derecho, el color azul oscuro se da en constantes de tiempo menores a 10 segundos).

Es notable aclarar que para cada gráfica en 3 dimensiones se ha intentado mostrar de la mejor manera la profundidad y forma de la misma, por lo que en algunas ocasiones, como en la figura Figura 3.49, la apertura de la persiana está en el eje del lado derecho y la radiación en el izquierdo, mientras que en la Figura 3.50 se muestran al contrario.

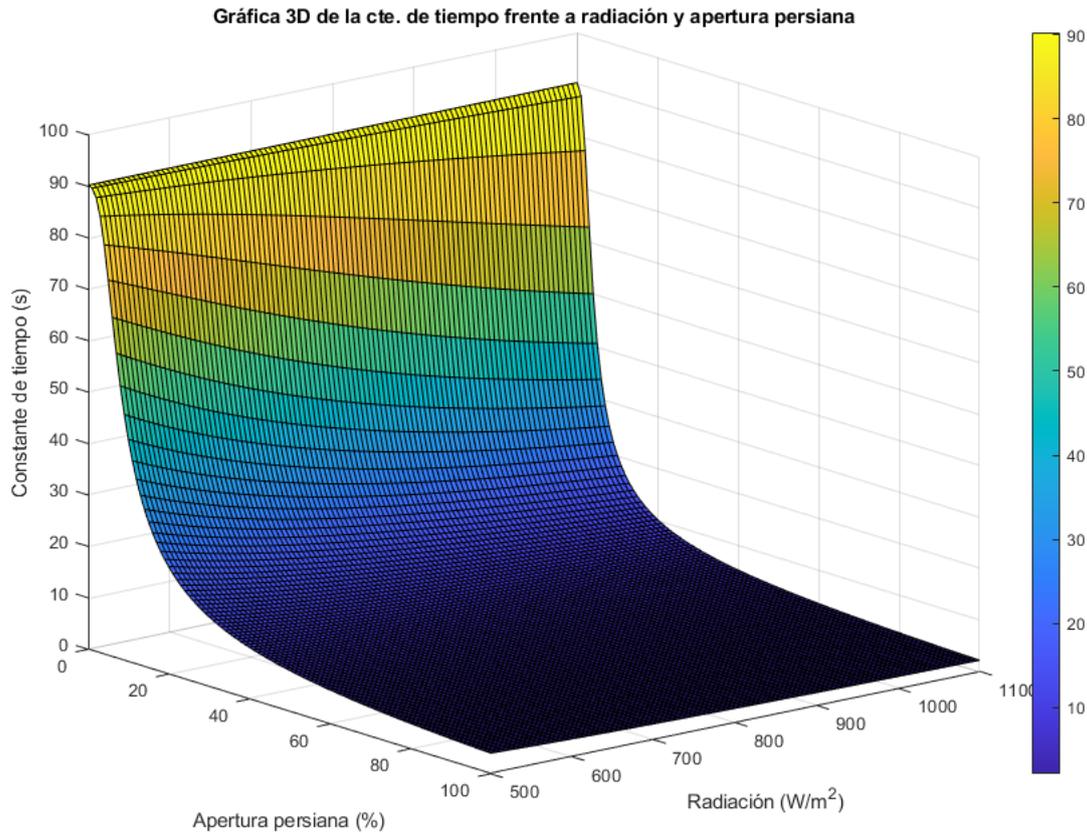


Figura 3.50. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo (τ) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de acero A316-L.

Por otra parte, se puede deducir que el modelo lineal es más rápido (a mayor constante de tiempo, más lento será el sistema, y viceversa) en apertura de persiana mayores, en las cuales además la no linealidad influye menos en este parámetro. Esta “rapidez” cuando la apertura de la persiana es mayor es deducible de la propia ecuación (2.24) que modela este parámetro, puesto que el valor de ésta es inversamente proporcional a la potencia tercera de la temperatura de la muestra de ensayo en estado estacionario, y la temperatura de la muestra de ensayo (tal y como se mostró anteriormente en la Figura 3.49) será mayor cuanto mayor sea la apertura de la persiana.

Estudiando la evolución de la constante de tiempo desde el lado de la radiación solar, se observa como a mayores valores de radiación (para valores de aperturas de persiana constantes), la constante de tiempo del modelo se hace más pequeña, y es mucho más pronunciado (al igual que ocurre con la apertura de persiana) cuando se trabaja a valores de porcentaje de apertura pequeños de la persiana. Esta variación de la constante de tiempo en función de la apertura de la persiana y la radiación es indirecta, puesto que como la ecuación (2.24) sugiere, la constante de tiempo depende de la temperatura de la muestra, siendo esta última la que depende de una forma directa de la radiación solar y la apertura de la persiana.

Finalmente, se muestra a continuación en la Figura 3.51 la dependencia de la ganancia del modelo lineal de primer orden respecto de la radiación y la apertura de la persiana, en base a la ecuación (2.22). Se observa como a apertura de persiana pequeñas (eje horizontal derecho) la ganancia es mucho más variable respecto la variabilidad que se da en apertura

de persiana mayores, lo cual evidencia como se comentó anteriormente, que el modelo no lineal es menos lineal en puntos de operación más bajos (puntos de operación en base a valores de % de la apertura de persiana).

Por su parte, estudiando la contribución de la radiación solar, se observa que ésta tiene mucha más influencia en la ganancia del modelo a valores de apertura de persiana más pequeñas que a grandes (se observa en la pendiente que tienen las líneas de ganancia en la gráfica 3D a valores de apertura de persiana constantes y variando la radiación solar). Por ejemplo, para valores bajos de apertura de persiana (en torno al 4 o 5 %) la escala de colores muestra cómo a valores de radiación de 1100 W/m^2 la ganancia es casi de $120 \text{ [}^\circ\text{C/\%]}$ mientras que para un valor de radiación de 500 W/m^2 la ganancia es de en torno a $80 \text{ [}^\circ\text{C/\%]}$. Sin embargo, esto solo ocurre a bajos valores de porcentaje de apertura de la persiana, puesto que a grandes la radiación influye muy poco en la ganancia (nótese en la Figura 3.51 cómo las líneas son más horizontales, paralelas al plano XY, conforme se aumenta el % de apertura de persiana).

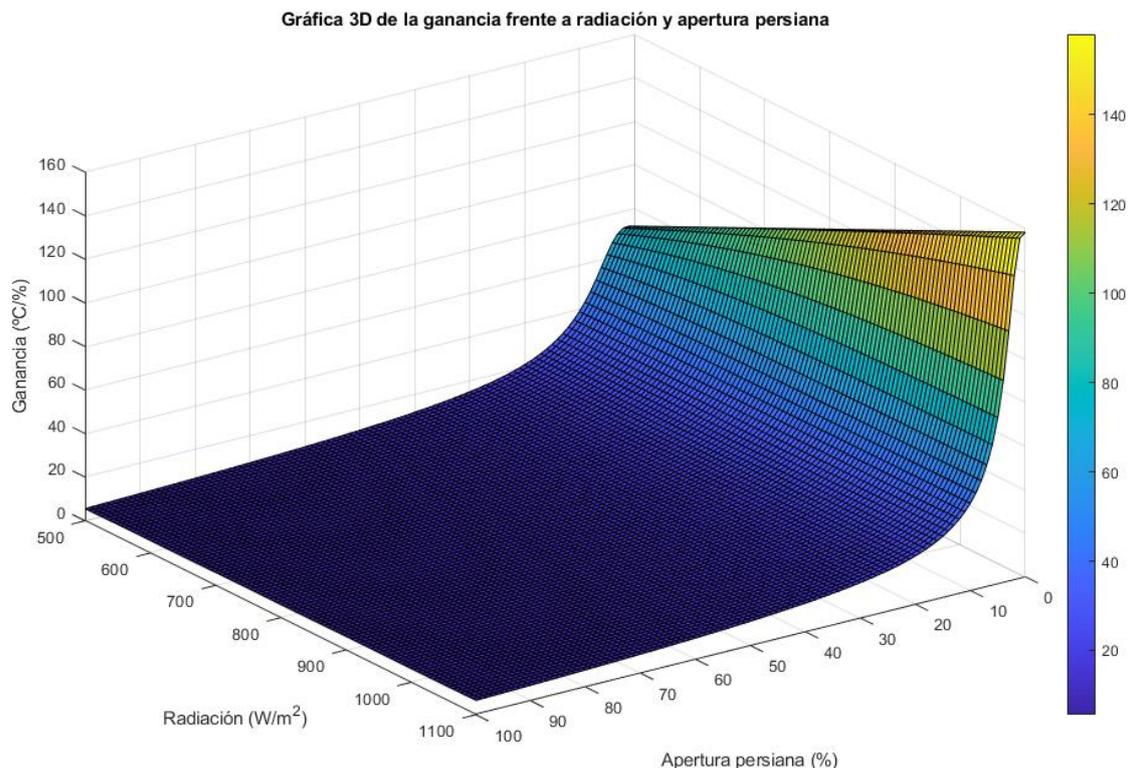


Figura 3.51. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia k_{ij} del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de acero A316-L

Por tanto, de este estudio se obtiene la siguiente conclusión: será necesario e imprescindible, a la hora de dividir el rango de operación en intervalos, tener en cuenta la no linealidad del sistema, obteniendo así intervalos del rango de operación que no son regulares respecto de las entradas (apertura de persiana o radiación), sino que se basen en una variación regular que sufre tanto la ganancia como la constante de tiempo, en base a las gráficas en 3 dimensiones de la Figura 3.50 y Figura 3.51.

Para simplificar se decide establecer los intervalos para los modelos en función de una variación de un 25 % de la ganancia total del modelo lineal. Para ello, sabiendo que aproximadamente la ganancia máxima es de 160 °C/% y la mínima es de 5°C/%, entonces los intervalos para la ganancia en función de la radiación y la apertura de la persiana podrían quedar delimitados de la siguiente forma que se muestra en la Figura 3.52, donde se han dibujado 3 planos paralelos al plano XY (y perpendiculares al eje Z) que cortan la superficie de la ganancia, delimitando de dicha forma los intervalos de amplitud aproximada de 38.75 [°C/%] para los cuales se diseñarán los modelos. Estos planos se definen como $Z_1=43.75$, $Z_2=82.50$ y $Z_3=121.25$, y se han resaltado en la Figura 3.52 varios puntos de corte de la superficie de la ganancia con los planos que separan cada intervalo.

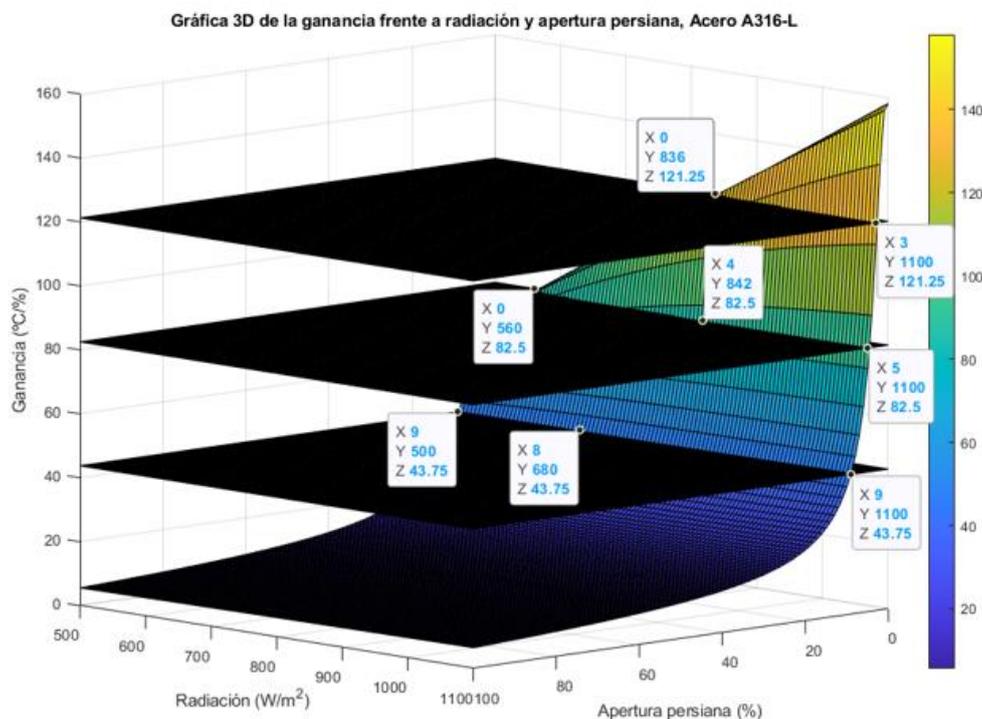


Figura 3.52. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m²), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos.

Se observa cómo en 3 de los 4 intervalos la radiación aparece en prácticamente (en el tercer intervalo, empezando por abajo, es a partir de 560 W/m²) todo su rango, excepto en el último de los intervalos que se ve cómo la radiación solo comprendería desde 836 W/m² hasta 1100 W/m². Por tanto, dado que la radiación solamente influye en este último intervalo, se decide despreciar la contribución de la radiación solar a la hora de calcular los modelos lineales con el objetivo de simplificar los cálculos, excepto en este intervalo comentado ($Z > 121.25$) donde la radiación sí influye notablemente en la separación de los intervalos en función de la ganancia.

Se puede observar cómo los intervalos son muy irregulares respecto a la apertura de la persiana, lo cual era de esperar tal y como se ha explicado con anterioridad la distribución de la ganancia del modelo respecto a esta variable. Este fenómeno es muy perjudicial ya que, por la forma que tiene la superficie de la ganancia respecto de la apertura de la

persiana y de la radiación, los valores de ganancia en el intervalo de menor altura (el eje Z) poseen valores muy altos cuando están cerca del límite más alto del intervalo, por lo que la mayor parte del intervalo hasta el límite del 100 % de apertura de persiana la ganancia del modelo lineal posee valores muy por debajo de los valores medios establecidos para el modelo.

Debido a esta última explicación que perjudica la calidad de los modelos lineales, se decide aplicar nuevos cortes en la superficie de la ganancia que dividan el intervalo más bajo de la Figura 3.52, tal y como se muestra a continuación en la Figura 3.53, que representa un zoom de Figura 3.52 con los nuevos cortes añadidos:

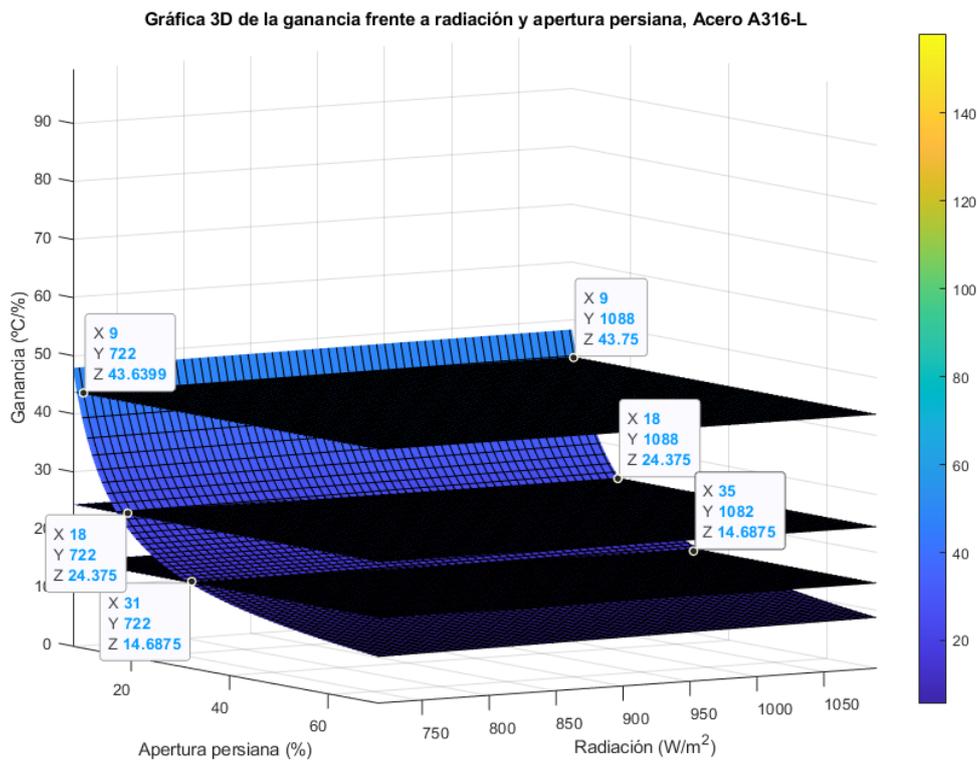


Figura 3.53. Zoom realizado a la gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos, con los dos planos extras añadidos para obtener más precisión en la división del rango de operación.

Así se llega a la Tabla 29, que delimita, en función los cortes de los planos con la superficie de trabajo, los intervalos de operación para la ganancia del modelo lineal, junto al valor medio para cada intervalo que se utilizará para cada modelo, que es la media entre la ganancia límite de cada intervalo:

Tabla 29. Intervalos del rango de operación para la apertura de la persiana establecidos para la muestra de acero A316-L, y ganancia media de cada intervalo.

Nº de intervalo	Límites de intervalos de ganancia ($^{\circ}C/\%$)		Límites de intervalos de apertura de persiana (%)		$k_{U,media}$ ($^{\circ}C/\%$)
	Inicial	Final	Inicial	Final	

1	160	121.25	0	3	140.625
2	121.25	82.50	3	5	101.875
3	82.50	43.75	5	9	63.125
4	43.75	24.375	9	18	34.063
5	24.375	14.689	18	33	19.532
6	14.689	5	33	100	9.845

Se puede observar cómo los intervalos son muy irregulares respecto a la apertura de la persiana, lo cual era de esperar tal y como se ha explicado con anterioridad la distribución de la ganancia del modelo respecto a esta variable.

Respecto a la constante de tiempo, se conoce que varía desde los 2 segundos hasta los 90 segundos. Dividiendo en 4 este rango de operación, se obtendrían intervalos de una amplitud de 22 segundos, y quedarían divididos según como se muestra en la Figura 3.54, donde además se han señalado algunos puntos de corte de la superficie 3D con los planos de corte perpendiculares al eje Z.

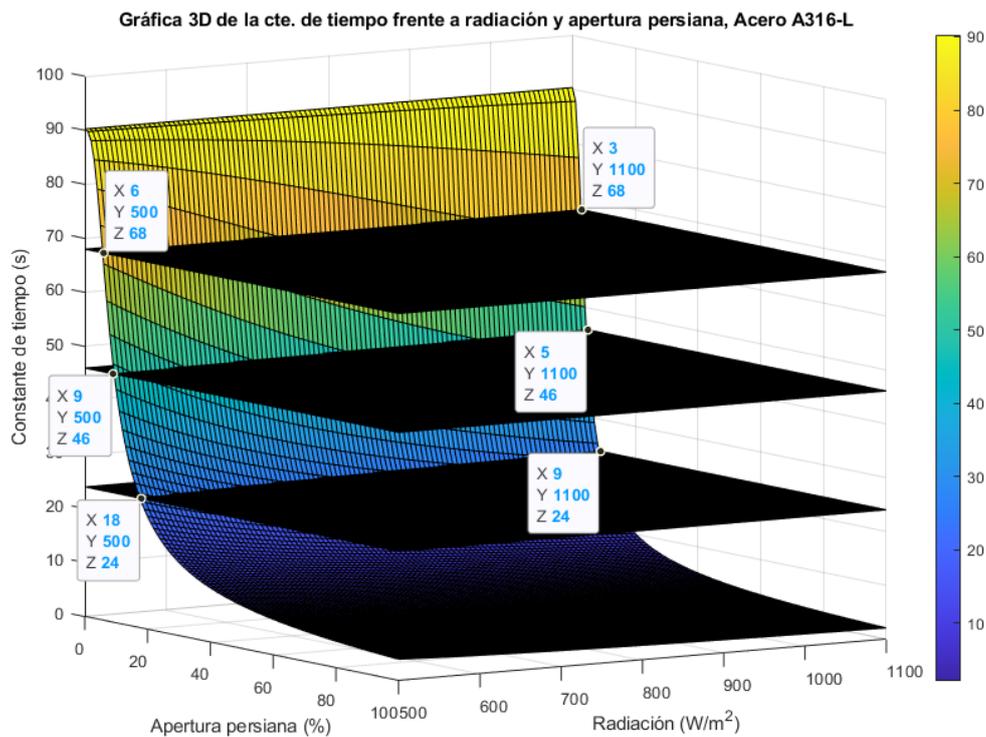


Figura 3.54. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m²), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos.

Como es notable de observar la Figura 3.54, se observa que la radiación posee su rango al completo dentro de cada intervalo definido por los cortes de los planos con la superficie 3D, lo que implica a su vez que no se tenga en cuenta la radiación para establecer los intervalos en la constante de tiempo. Sin embargo, la apertura de la persiana sí que tiene una fuerte dependencia con la constante de tiempo, y en base a ella se establecen en consecuencia los intervalos en los que se divide el rango de operación para cada modelo lineal. Sin embargo, al igual que ocurre con la ganancia, es notable observar cómo el

intervalo de menor altura (eje Z de la gráfica) comprende casi todo el rango de operación de la muestra (de un 18 % al 100%) y posee una parte muy importante de la no linealidad del modelo (zona con una pendiente muy grande), por lo que se decide realizar un corte más en la superficie de valores de la constante de tiempo y dividir así ese intervalo en 2, con el objetivo de aumentar la precisión. Por tanto, se realiza como se ha dicho un corte adicional en la constante de tiempo para un valor Z=13 segundos, lo cual se muestra en la Figura 3.55

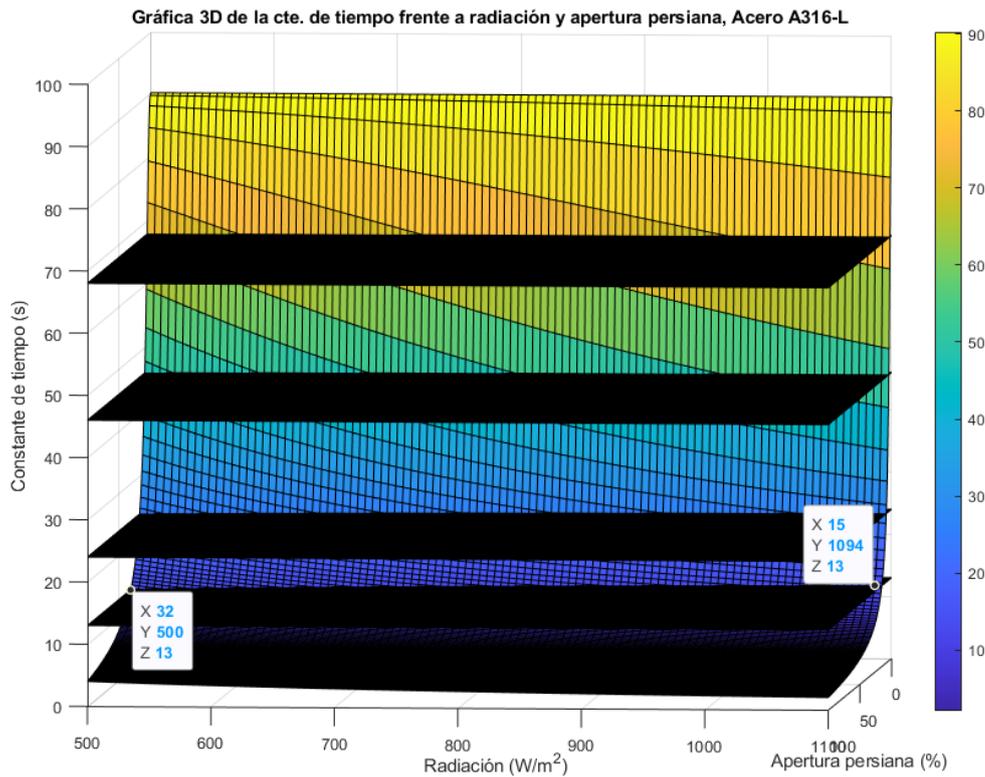


Figura 3.55. Zoom realizado a la gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos, con el plano extra añadido para obtener más precisión en la división del rango de operación.

A continuación, se presenta en la Tabla 30 la distribución de las constantes de tiempo para los intervalos definidos por los cortes anteriores del rango de operación, con las constantes de tiempo medias de cada uno de los intervalos establecidos.

Tabla 30. Intervalos del rango de operación establecidos para la muestra de acero A316-L, y constante de tiempo media para cada uno.

Nº de intervalo	Límites de intervalos de constante de tiempo (s)		Límites de intervalos de apertura de persiana (%)		$\tau_{media}(s)$
	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	90	68	0	5	79
2	68	46	5	9	57
3	46	24	9	18	35
4	24	13	18	32	18.50
5	13	9	32	100	9

Como se puede observar, los intervalos han sido establecidos de forma aproximada debido a que la línea de corte que se produce entre la superficie (ya sea de la ganancia o de la constante de tiempo) con los planos de corte perpendiculares al eje Z no es una línea recta, sino que se curva debido a la forma de la superficie en tres dimensiones.

La siguiente cuestión a destacar es que la distribución del rango de operación en intervalos para la ganancia no coincide con la realizada para la constante de tiempo, ya que se han obtenido 6 ganancias medias y 5 constantes de tiempo medias; sin embargo, si se cruzan los datos de la Tabla 29 y la Tabla 30 y si se tiene en cuenta la influencia de la radiación, finalmente se obtiene la Tabla 31 que resume los 6 modelos lineales estimados en este trabajo para la muestra de acero A316-L, donde se observa que el modelo nº 2 se repite dos veces debido a que, tal y como se observó en la división del rango de operación para la ganancia (ver Figura 3.52), el plano de valor $z= 82.50$ que cortó a la superficie de la ganancia provocó que la parte superior a dicho, perteneciente al intervalo de mayor ganancia, sólo sea válido para radiaciones entre 800 W/m^2 y 1100 W/m^2 (se ha redondeado el valor de 836 a 800 para simplificar el cálculo).

También se comenta que algunos valores obtenidos de los cortes de la ganancia se han ajustado para que coincidan con los cortes de las constantes de tiempo para simplificar los cálculos y obtener unos intervalos regulares con modelos lineales definidos.

Tabla 31. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de acero A316-L.

Nº de modelo	Apertura de persiana (%)		Radiación (W/m^2)		Ganancia, k_U ($^{\circ}\text{C}/\%$)	Constante de tiempo, τ (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
1	0	3	1100	800	140.625	79
2A	0	3	800	500	101.875	79
2B	3	5	Todo el rango		101.875	79
3	5	9	Todo el rango		63.125	57
4	9	18	Todo el rango		34.063	35
5	18	32	Todo el rango		19.532	18.50
6	32	100	Todo el rango		9.845	9

Nótese que estos modelos lineales diseñados funcionan para todo el rango de la radiación considerado en el trabajo excepto para el primer modelo, debido a lo que se explicó anteriormente tras el resultado de aplicar los “cortes”, con los planos paralelos al eje XY, a la superficie de la ganancia en la Figura 3.52, por lo que este modelo solo será apto cuando la radiación se encuentre en el rango estipulado (realmente lo que cambia es únicamente la ganancia respecto al primer modelo y al segundo).

Se aplicará dentro de cada intervalo un conjunto de escalones y rampas intentando abarcar la mayor parte del rango de operación dentro de cada intervalo para cada modelo. A continuación, se comenzará validando el primer modelo lineal, que será un caso especial entre los modelos diseñados, tal y como se apuntó en la Tabla 31, puesto que se validará solo para el rango de operación de 850 W/m^2 a 1100 W/m^2 .

Dado el intervalo de la radiación utilizado para la obtención de los modelos, desde los 500 W/m² hasta los 1100 W/m², se introducirá la entrada estipulada para cada intervalo (se irá definiendo en concreto para la validación de cada modelo lineal) para distintos valores de radiación constantes por separado (esto se hará así excepto en el primer intervalo de apertura de la persiana, donde la radiación está dividida como se mostró en la Tabla 31, y se aplicará como se comentará a continuación un criterio distinto). Además, en todos los ensayos la temperatura ambiente se ha considerado igual a 25 °C.

Por último, se validarán los modelos lineales establecidos para la muestra de acero A316-L y se aplicarán unos índices de funcionamiento de los modelos, los mismos que se aplicaron para validar el modelo no lineal sobre los datos de ensayo reales.

- Validación del primer modelo lineal, de 0 % a 3 % de apertura de la persiana.

$$G_1(s) = \frac{140.625}{79s + 1}$$

Para la validación del modelo n°1 se le aplica una serie de cambios en la entrada tal y como se recoge en la Tabla 32, durante un tiempo de simulación de 5000 segundos. Estos cambios son entradas en escalón en la mayoría de los casos, en cuyo caso en la tabla se define la amplitud del escalón, mientras que si es una rampa lo que se indica es la pendiente de la rampa. Nótese que cuando se introduce una rampa, posteriormente se introduce otra de signo contrario para cancelarla, y estableciendo la pendiente de las rampas como el cociente resultante de dividir la altura que se quiere alcanzar entre el tiempo de simulación necesario para ello.

Tabla 32. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal n°1, Acero A316-L.

Instante de simulación	Forma de la entrada	Amplitud (%) o pendiente (%/s)
500	Escalón	-0.25
1000	Escalón	+0.50
1500	Rampa	+(0.25/250)
1750	Rampa	-(0.25/250)
2000	Escalón	+0.50
2500	Escalón	+0.50
3500	Escalón	+0.50
3500	Rampa	-(0.50/500)
4000	Rampa	+(0.50/500)
4500	Escalón	-0.50
5000	Escalón	-1
5500	Escalón	-0.25
6000	Escalón	-0.25

Los valores para la apertura de la persiana que se presentan en la Tabla 32 se muestran ahora de forma gráfica en la Figura 3.56, donde se puede observar que valor inicial de la apertura de la persiana se ha escogido 0.50 %, para así aplicar posteriormente los cambios en la entrada tabulados en la Tabla 32.

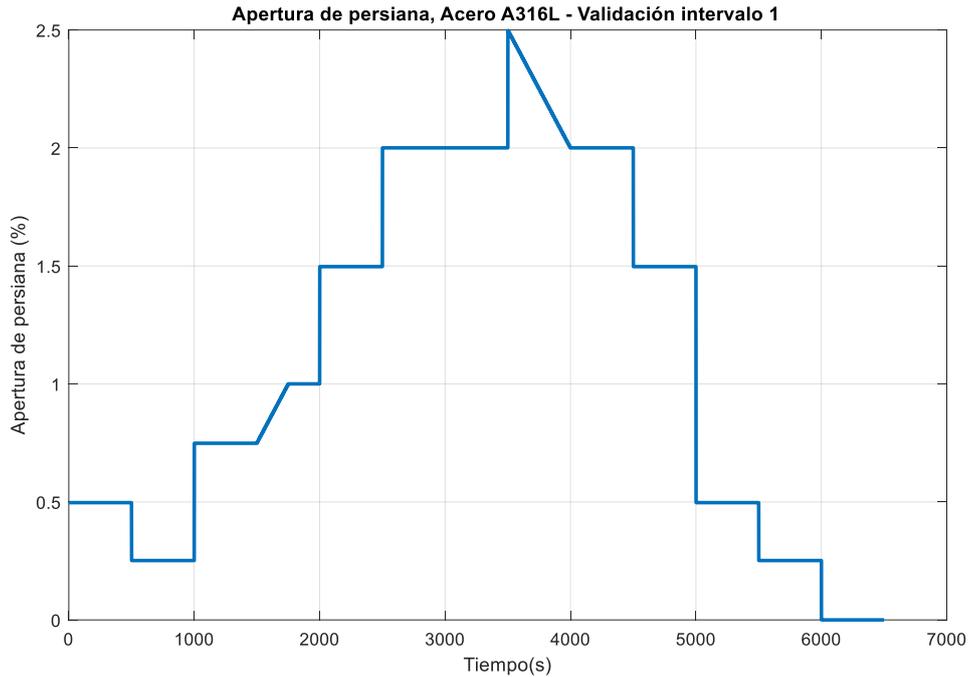


Figura 3.56. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°1, muestra de acero A316-L.

El siguiente paso sería el de validar el modelo para distintos valores de radiación, que se mantendrá constante en cada ensayo. Dado que este intervalo está diseñado para un valor de radiación de 800 W/m^2 a 1100 W/m^2 , se le introducirá la entrada estipulada en la Figura 3.56 y en la Tabla 32 y se obtendrán los índices de funcionamiento.

Primero, se realiza el ensayo con un valor de radiación constante e igual a 900 W/m^2 , mostrándose el resultado en la Figura 3.57, donde se puede apreciar cómo el ajuste entre el modelo lineal y no lineal es bastante bueno, y cuando la apertura de la persiana toma valores mayores (más cercanos al límite superior del intervalo, el 3% de apertura de la persiana) el error entre la salida del modelo lineal y la salida del modelo no lineal va aumentando, siendo superior la ganancia en el modelo lineal; esto se aprecia mejor en la Figura 3.58 que se incluye seguidamente de la Figura 3.57, que muestra el error en valor absoluto entre las dos salidas de los modelos. En cambio, en los límites inferiores del intervalo (el 0% de apertura de la persiana), el error no es tan grande.

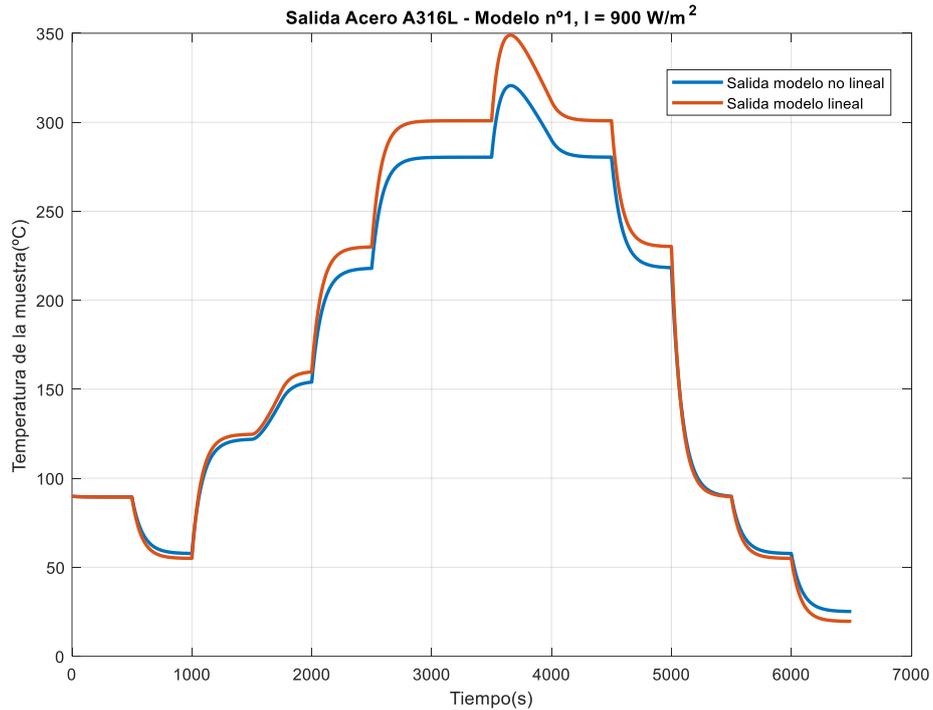


Figura 3.57. Validación modelo lineal n°1 de la muestra de acero A316-L, radiación 900 W/m^2 .

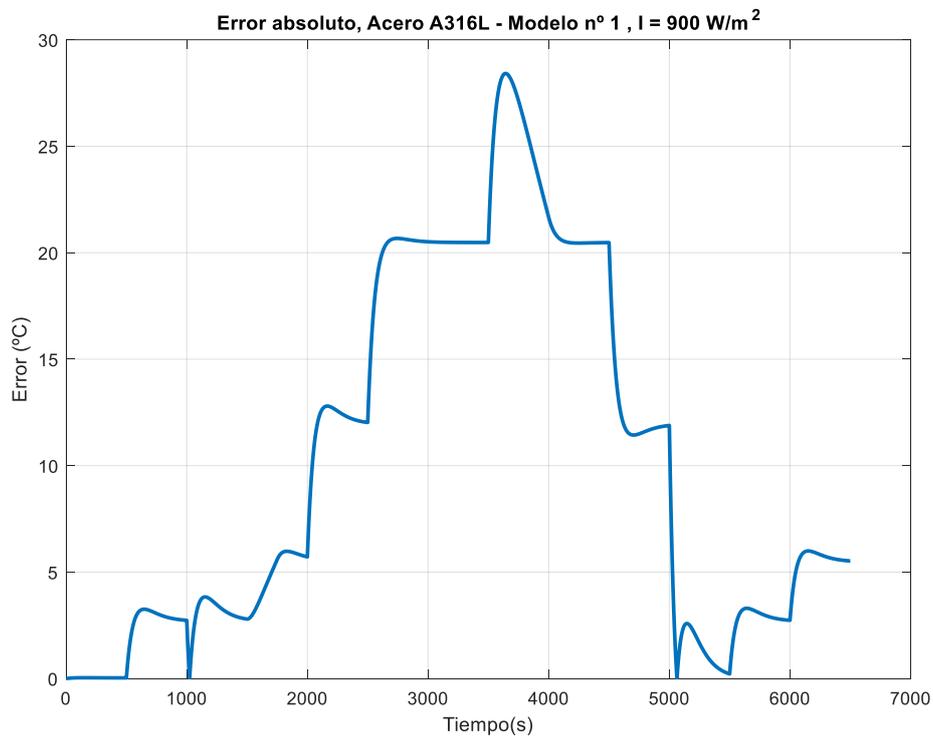


Figura 3.58. Error de validación, modelo lineal n°1 de la muestra de acero A316-L, radiación 900 W/m^2 .

Seguidamente, se muestra el resultado de validar el modelo para el intervalo dado con un valor de radiación igual a 1000 W/m^2 en la Figura 3.59, donde se aprecia que el ajuste entre el modelo lineal y el no lineal es muy fino, lo cual queda reflejado de igual forma en la Figura 3.60 que muestra el error en valor absoluto entre la salida del modelo lineal

y la salida del modelo no lineal. Si se compara la respuesta que se obtiene en este ensayo a 1000 W/m^2 con el ensayo a 900 W/m^2 , se concluye que el valor de la ganancia establecida para el modelo lineal en este intervalo está mejor ajustada para el nivel de radiación de 1000 W/m^2 (esta conclusión se puede reafirmar si se observa con detalle la gráfica en 3 dimensiones de la Figura 3.52 en la que se realizó la partición de los intervalos, y por tanto muestra la gran dependencia que posee el modelo con la radiación solar en este intervalo).

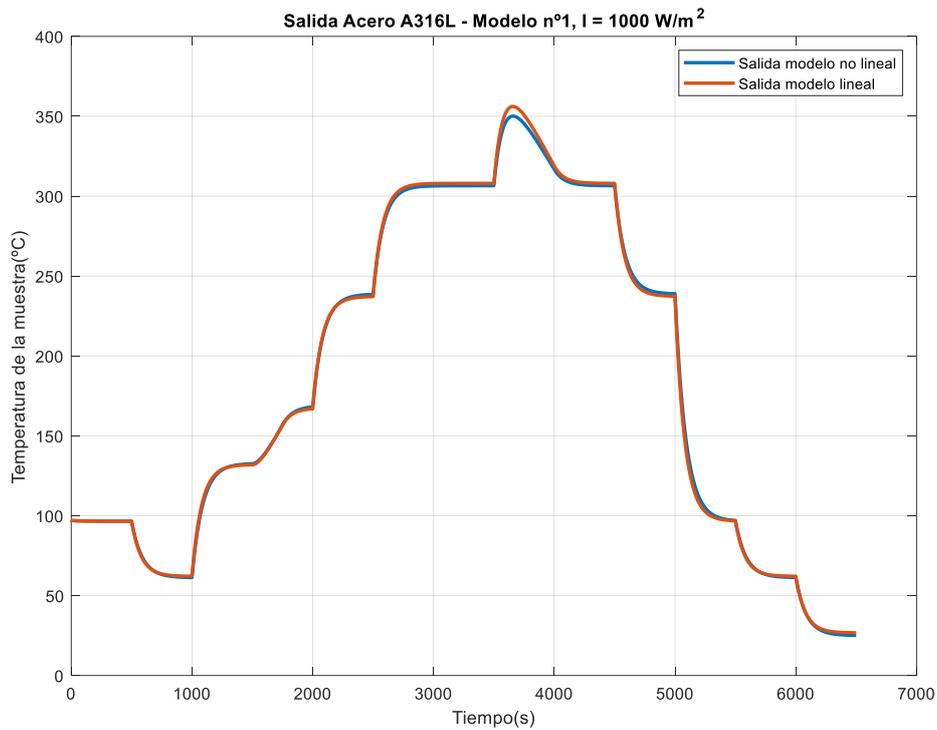


Figura 3.59. Validación modelo lineal nº1 de la muestra de acero A316-L, radiación 1000 W/m^2 .

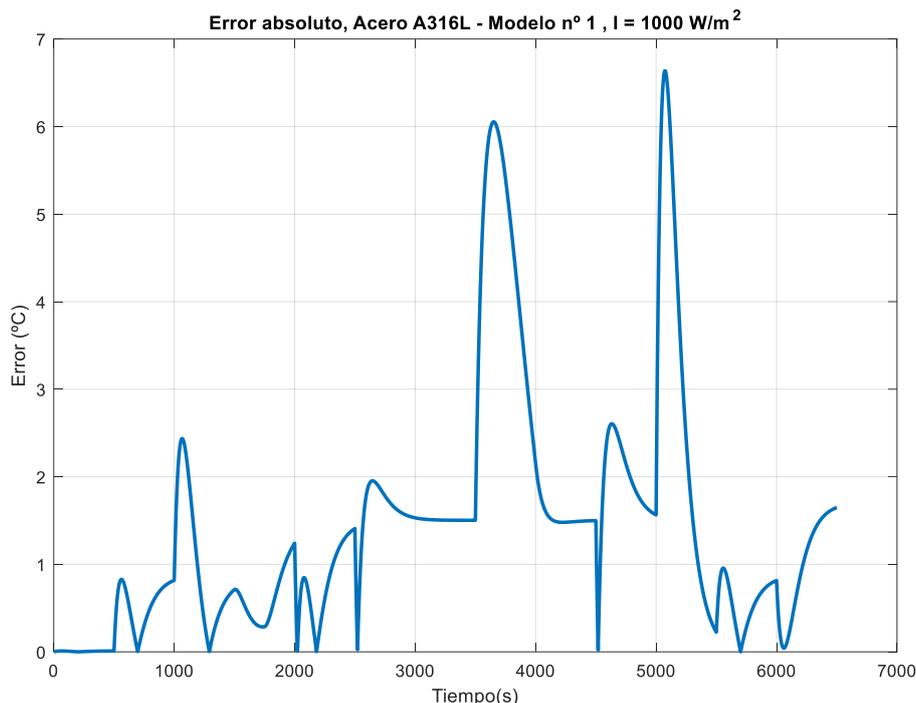


Figura 3.60. Error de validación, modelo lineal n°1 de la muestra de acero A316-L, radiación 1000 W/m².

Por último, se obtienen los índices de funcionamiento para estos dos ensayos, que se muestran en la Tabla 33, los cuales reflejan muy buenos resultados, y reafirman lo comentado anteriormente de que el modelo lineal de este primer intervalo funciona mejor en el segundo caso, cuando la radiación toma valores más altos, pues la ganancia media se acerca más la ganancia que tiene el modelo no lineal en ese punto de operación influenciado por el nivel de radiación solar.

Tabla 33. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°1 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 900 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 1000 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	28.4187	6.6379
Error medio absoluto (°C)	10.1229	1.4203
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	13.2684	1.9841
R²	0.9805	0.9996

Se observa como el error máximo absoluto es de 6.64 °C para el segundo ensayo, valor el cual se obtiene tras aplicar el escalón de una amplitud de un 1 % (escalón de mayor amplitud, que representa un 33 % de la apertura de persiana del intervalo para el que ha sido calculado el modelo lineal), que se ve bien reflejado en la Figura 3.60 que se produce

poco después de los 5000 segundos de simulación. En el caso del primer ensayo, este pico de 28.42 °C se da en un instante distinto de tiempo, después de los 3500 segundos de simulación debido a que se trabaja a aperturas de la persiana más cercanas al límite superior de 3% de apertura de persiana, solo que en este caso (con 800 W/m²) el error máximo es casi 5 veces superior al del ensayo con 900 W/m².

Por otro lado, el error medio absoluto y el RMSE proporcionan también valores muy bajos, menores a 2 °C de amplitud en el segundo ensayo (resultado bastante bueno) pero valores mayores para el primero (en torno a los 10 °C), aunque en general representan resultados muy deseables desde el punto de vista del modelado. Por último, el valor de R² devuelve un valor de casi 1 en la validación a 1000 W/m², lo cual es lógico pues se puede observar como la señal del modelo lineal es prácticamente igual a la del no lineal durante todo el tiempo de simulación en este ensayo de validación; el valor de R² es algo peor para el segundo caso, pero sigue siendo bastante bueno (mayor al 98%) e indica que la dinámica del modelo lineal es realmente parecida a la del no lineal.

Finalmente, se puede obtener una conclusión de estas dos validaciones, y es que a apertura de persiana pequeñas (cercanas al límite inferior del intervalo, 0 %) el error es más pequeño que cuando se trabaja a apertura de persiana mayores (cercanas límite superior del intervalo, 3%), y esto se debe a la no linealidad tan fuerte a esas aperturas de persiana, donde la superficie en 3 dimensiones de la ganancia toma una pendiente muy vertical (ver Figura 3.52).

- Validación del segundo modelo lineal, rango del 0 % a 5 % de apertura de persiana.

$$G_2(s) = \frac{101.875}{79s + 1}$$

Esta validación para el modelo lineal n^o2, donde la ganancia respecto al primer modelo es inferior, se hará en 2 partes, tal y como se describió anteriormente en la Tabla 31, ya que este segundo modelo es válido en dos situaciones distintas que se describen a continuación:

1. Caso A: un rango de apertura de persiana de 0% a 3% junto a un rango de radiación de 500 W/m² a 800 W/m².
2. Caso B: un rango de apertura de persiana de 3% a 5% junto a un rango de radiación completo (500 W/m² a 1100 W/m²).

Se empieza por validar el modelo lineal para el caso A, es decir, un rango de apertura de 0% a 3% y radiación de 500 W/m² a 800 W/m²; para ello, se le aplicará la misma entrada establecida en el anterior apartado de validación (ver Tabla 35 y Figura 3.56). Se introduce un valor de radiación constante e igual a 600 W/m² en un ensayo y de 700 W/m² en el siguiente, siendo estos valores medios del intervalo para el cual han sido diseñados los modelos, tal y como se ha explicado.

Primeramente, se muestran los resultados de la salida de los modelos lineal y no lineal en la Figura 3.61 para un valor de radiación de 600, lo que devuelve un resultado en el que el error que se produce es grande cuando se acerca el punto de trabajo al límite superior del intervalo (3% de apertura de persiana), al igual que pasaba en la validación del modelo

nº1. Esto se puede apreciar mejor en la gráfica de error adjunta seguidamente, donde en torno a 2500 segundos se produce el pico máximo de error de casi 30 °C (esto se ahondará más en la valoración de los índices de funcionamiento).

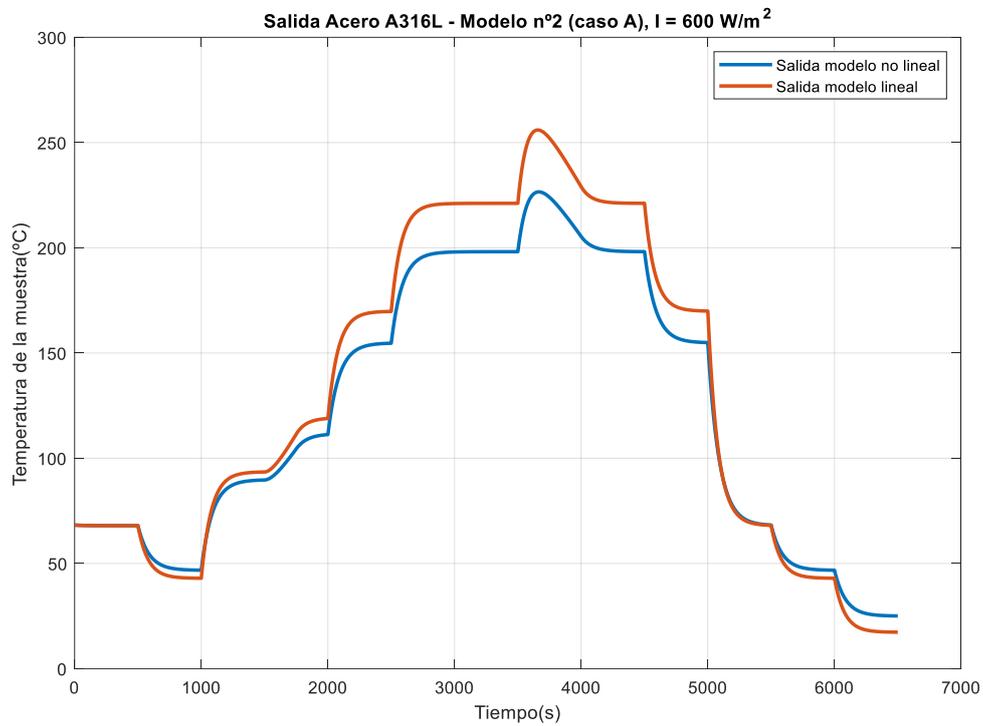


Figura 3.61. Validación modelo lineal nº2 (caso A) de la muestra de acero A316-L, radiación 600 W/m².

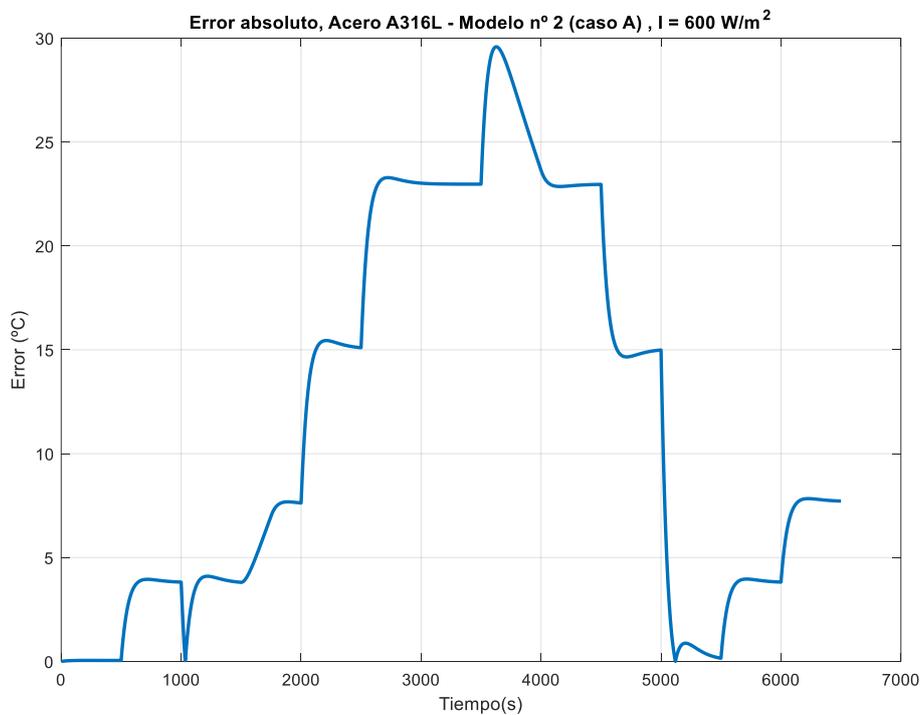


Figura 3.62. Error de validación, modelo lineal nº2 (caso A) de la muestra de acero A316-L, radiación 600 W/m².

Seguidamente se realiza el mismo ensayo pero con una radiación igual a 700 W/m^2 , y se muestra el resultado a continuación en la Figura 3.63 donde esta vez al aumentar la radiación en 100 W/m^2 respecto del ensayo anterior se observa como el error se reduce demasiado, llegando a coincidir casi plenamente la salida del modelo lineal con el no lineal. Este resultado una vez más valida que en este intervalo de apertura de persiana, la influencia de la radiación en el modelo lineal es determinante. Por último, a modo aclaratorio, se muestra la gráfica del error absoluto entre el modelo lineal y el modelo no lineal en la Figura 3.64.

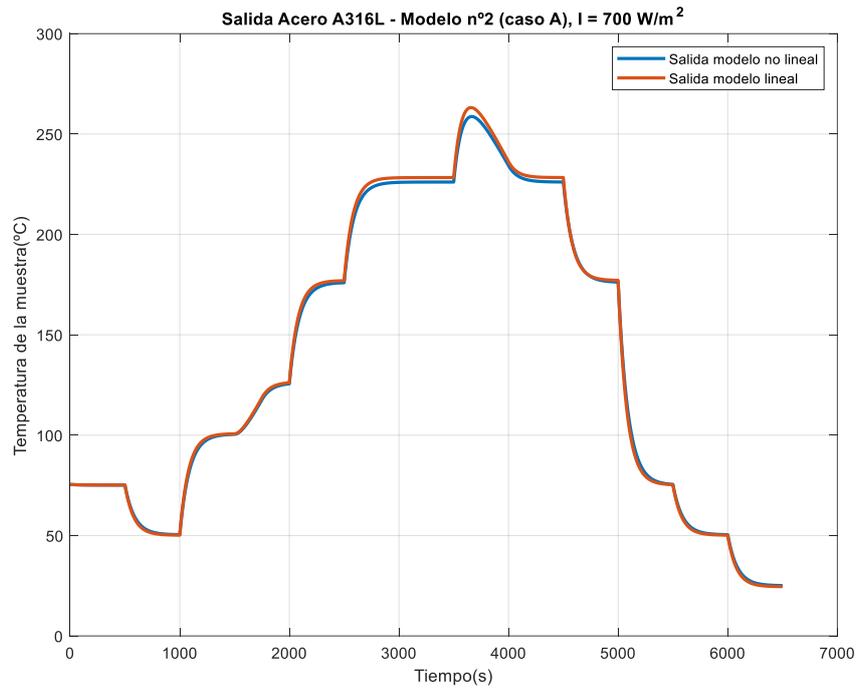


Figura 3.63. Validación modelo lineal n°2 (caso A) de la muestra de acero A316-L, radiación 700 W/m^2 .

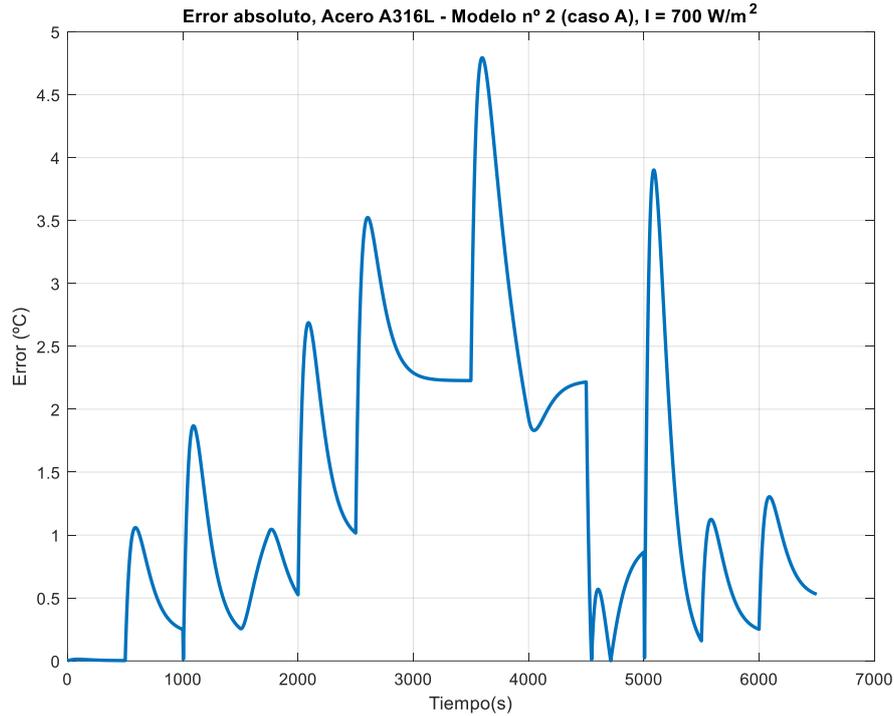


Figura 3.64. Error de validación, modelo lineal n°2 (caso A) de la muestra de acero A316-L, radiación 700 W/m².

Por último, para el caso A del modelo n°2, se muestran los índices de funcionamiento en la Tabla 34 obtenidos de las validaciones que, como se puede observar, ofrecen valores muy distintos entre sí.

Tabla 34. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°2 (caso A) respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 600 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 700 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	29.5813	4.7933
Error medio absoluto (°C)	11.6420	1.3967
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	14.9375	1.7889
R²	0.9466	0.9994

Se observa gran diferencia de resultados respecto del primer ensayo y del segundo, siendo el segundo una validación con unos índices de funcionamiento muy cercanos a la perfección, inclusive el propio error máximo absoluto que por lo general aumenta mucho en los demás ensayos y en esta validación a 600 W/m² el error máximo no llega a 5 °C (mientras que en el ensayo a 700 W/m² el error es de casi 30 °C). Por otra parte, el error medio y el RMSE en el ensayo a 600 W/m² no supera los 2 °C mientras que en el otro

ensayo de validación superan los 10 °C ambos índices. Por último, la diferencia entre el índice R^2 es también muy grande, siendo en el ensayo 2 prácticamente igual a la unidad.

Una vez más, se concluye a la vista de los resultados de los índices de funcionamiento que para este intervalo el modelo lineal es muy dependiente de la radiación solar a la que se trabaje, y también que dada la no linealidad del modelo (no lineal) se puede ver como la ganancia media del intervalo está situada a una radiación más cercana al límite superior (800 W/m^2) y a una apertura de la persiana más cercana al límite inferior, tal y como se podía intuir de la Figura 3.52 donde se analizó la ganancia del modelo en 3 dimensiones para la muestra de acero A316-L.

Una vez validado el modelo para el caso A descrito al principio de este apartado, se validará el modelo n°2 para el rango de apertura de la persiana entre 3 % y 5%, correspondiente al caso B, siguiendo el mismo procedimiento del anterior ensayo y estableciendo inicialmente un conjunto de cambios en la entrada en un tiempo de simulación determinado para el intervalo dado. Esta información se recoge en la Tabla 35, donde se parte inicialmente de una apertura de la persiana de 3.25 %, y llevando por tanto en todos los casos la salida del modelo lineal al punto de operación dado por ese valor de apertura de persiana en estado estacionario y los pertinentes en radiación y temperatura ambiente (este último será de 25 °C en todos los casos).

Tabla 35. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal n°2, Acero A316-L.

Instante de simulación	Forma de la entrada	Amplitud (%) o pendiente (%/s)
500	Escalón	-0.25
1000	Escalón	+0.50
1500	Rampa	+(0.25/250)
1750	Rampa	-(0.25/250)
2000	Escalón	+0.50
2500	Escalón	+0.50
3500	Escalón	+0.50
3500	Rampa	-(0.50/500)
4000	Rampa	+(0.50/500)
4500	Escalón	-0.50
5000	Escalón	-1
5500	Escalón	-0.25
6000	Escalón	-0.25

A continuación se muestra en la Figura 3.65 de forma gráfica la entrada a los modelos tras aplicar lo descrito en la Tabla 35, donde se intenta abarcar todo el rango del intervalo de 3% a 5%.

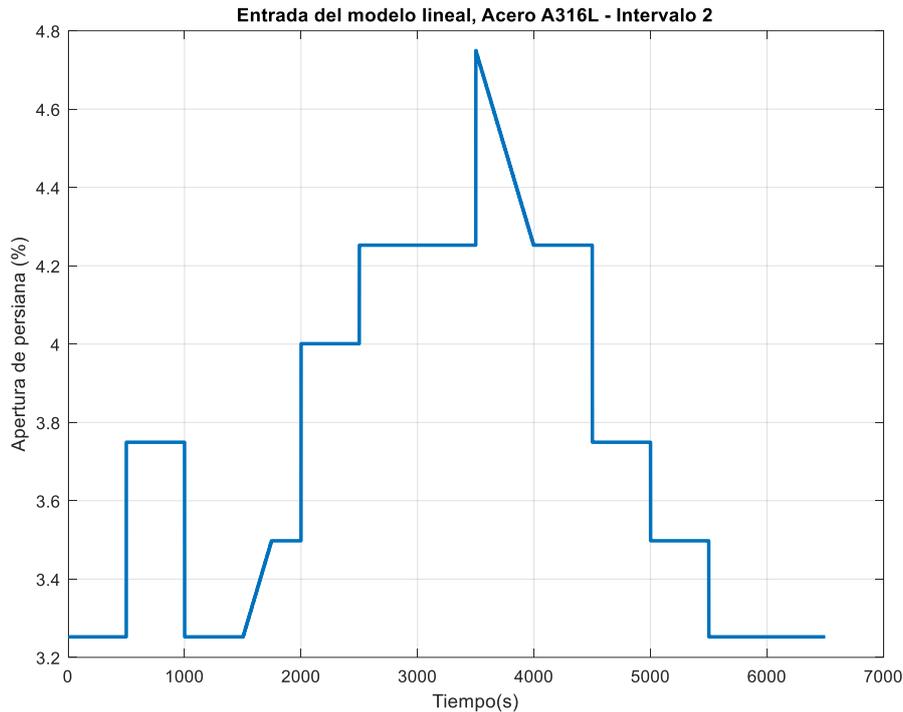


Figura 3.65. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°2, muestra de acero A316-L.

Dado que este intervalo está diseñado para todo el rango de la radiación solar, se procederá entonces de la siguiente forma: se aplicará las mismas entradas definidas en la Tabla 35 para 3 valores distintos de radiación: 650 W/m^2 , 800 W/m^2 y 950 W/m^2 .

Primeramente, se muestra el resultado de validar el modelo lineal n°2 con 650 W/m^2 en la Figura 3.66, donde es destacable lo mal que ajusta el modelo lineal con el no lineal ante radiaciones tan bajas y cuando la apertura de la persiana toma valores cercanos al límite superior del intervalo, en este caso, 5 %. Seguidamente se muestra en la Figura 3.67 el error absoluto entre la salida del modelo lineal y la salida del modelo no lineal, que evidencia el pico de error de casi $30 \text{ }^\circ\text{C}$ que se da en el caso de máxima apertura de persiana de la simulación.

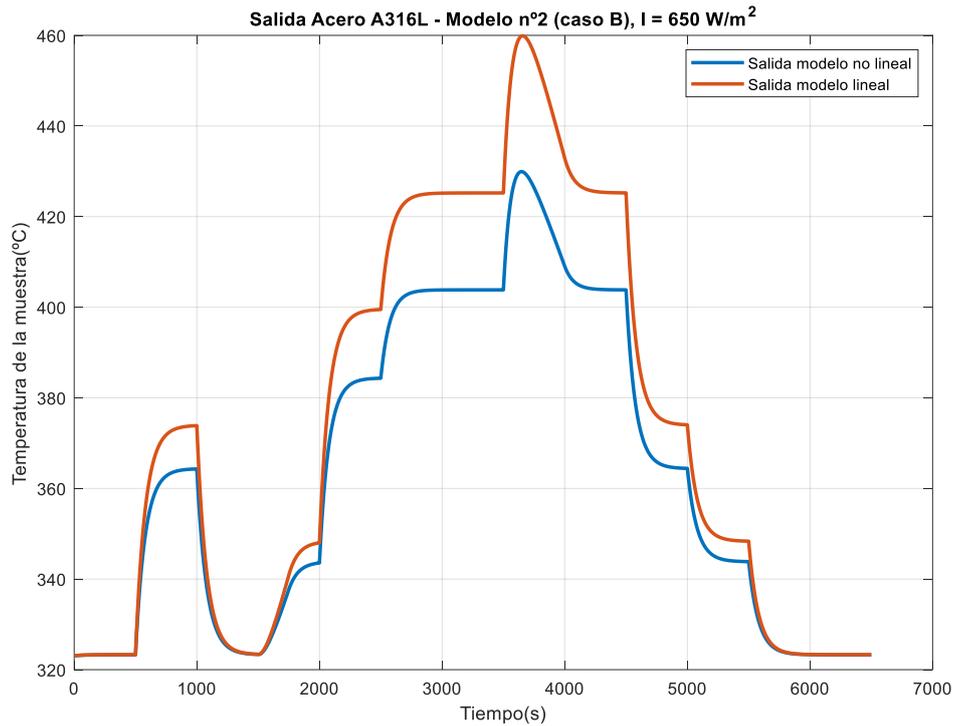


Figura 3.66. Validación modelo lineal n°2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m².

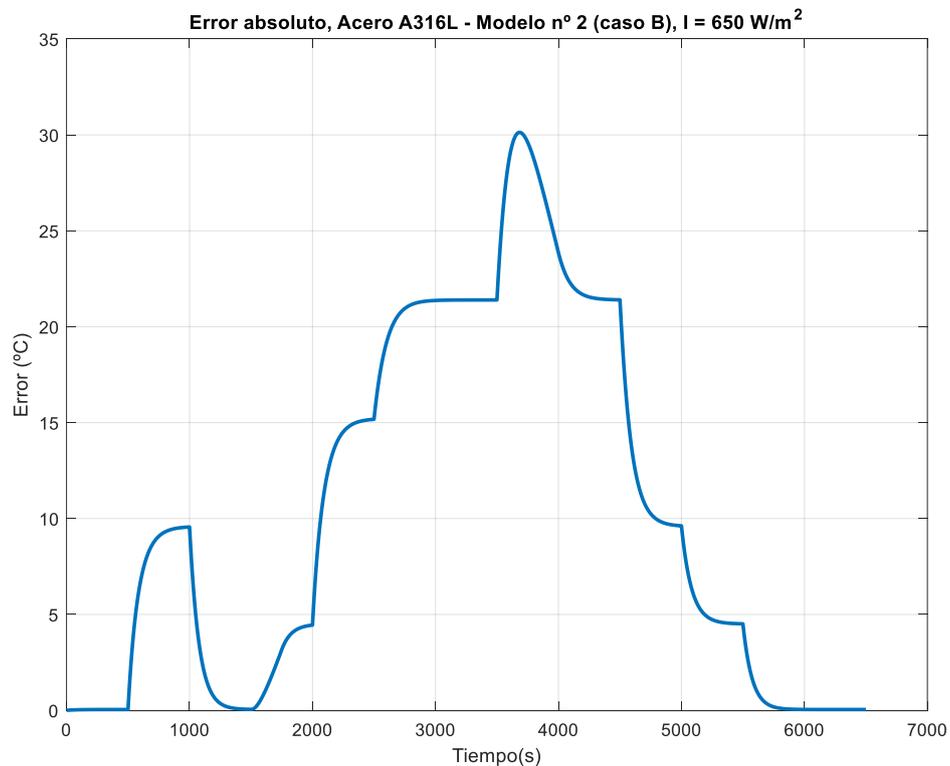


Figura 3.67. Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m².

La siguiente simulación es para una radiación de 800 W/m², cuyos resultados se muestran a continuación en la Figura 3.68, y donde se aprecia respecto del ensayo anterior que la

radiación influye notablemente en la ganancia del modelo no lineal puesto que al aumentar la radiación, la ganancia del modelo no lineal aumenta y se reduce el error entre la salida del modelo lineal y el no lineal, como se muestra en la Figura 3.69, entre este ensayo a 800 Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m² y el anterior a Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 600 W/m² (ver Figura 3.67).

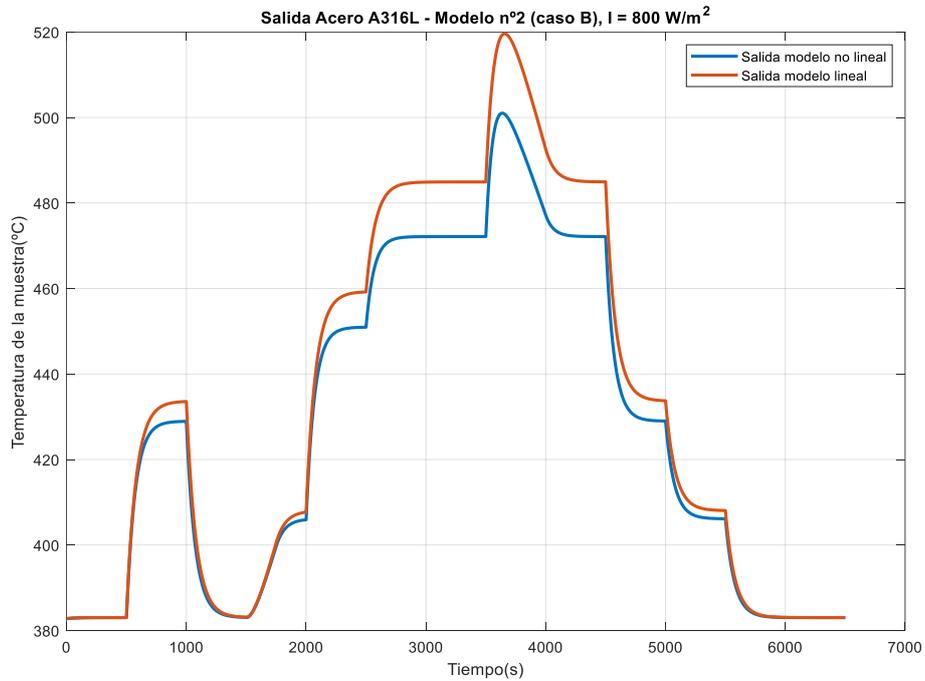


Figura 3.68. Validación modelo lineal n°2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m².

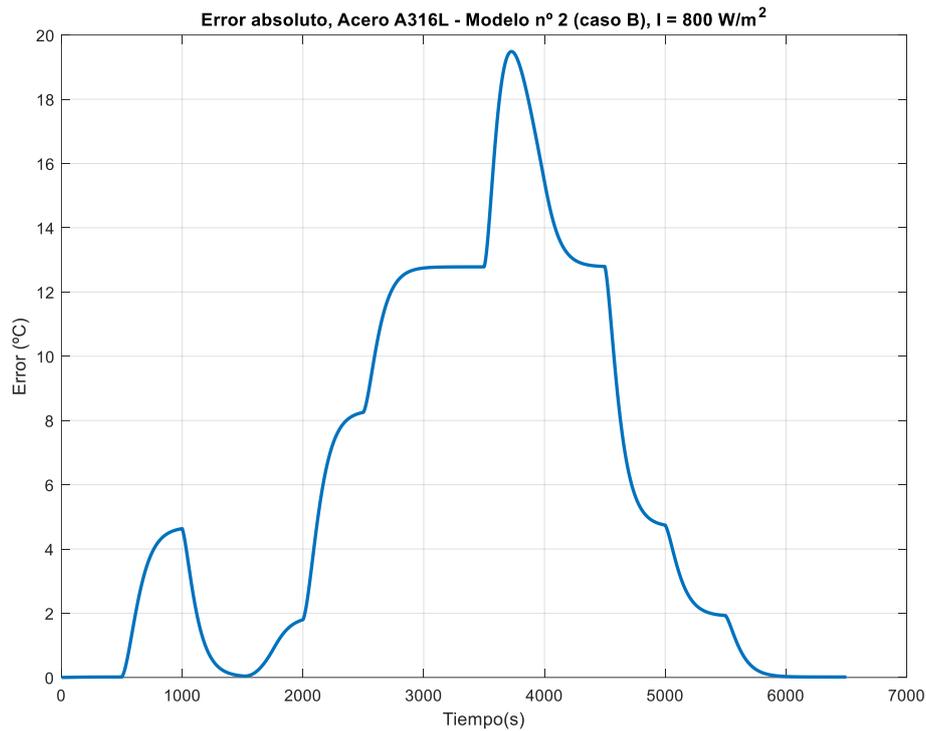


Figura 3.69. Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m².

Finalmente, se realiza un último ensayo de validación, que se muestra en la Figura 3.70 con una radiación igual a 950 W/m², más cercana al límite superior del rango total de radiación donde se observa como el modelo no lineal posee una mayor ganancia y por tanto se reduce el error absoluto (ver Figura 3.71) entre las dos señales.

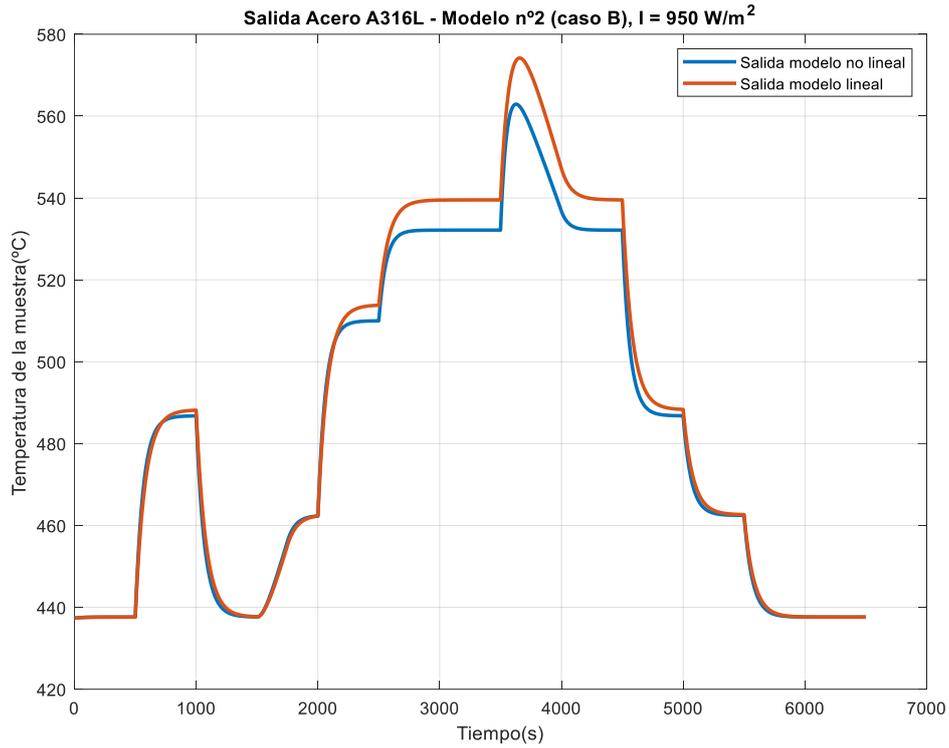


Figura 3.70. Validación modelo lineal n°2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m².

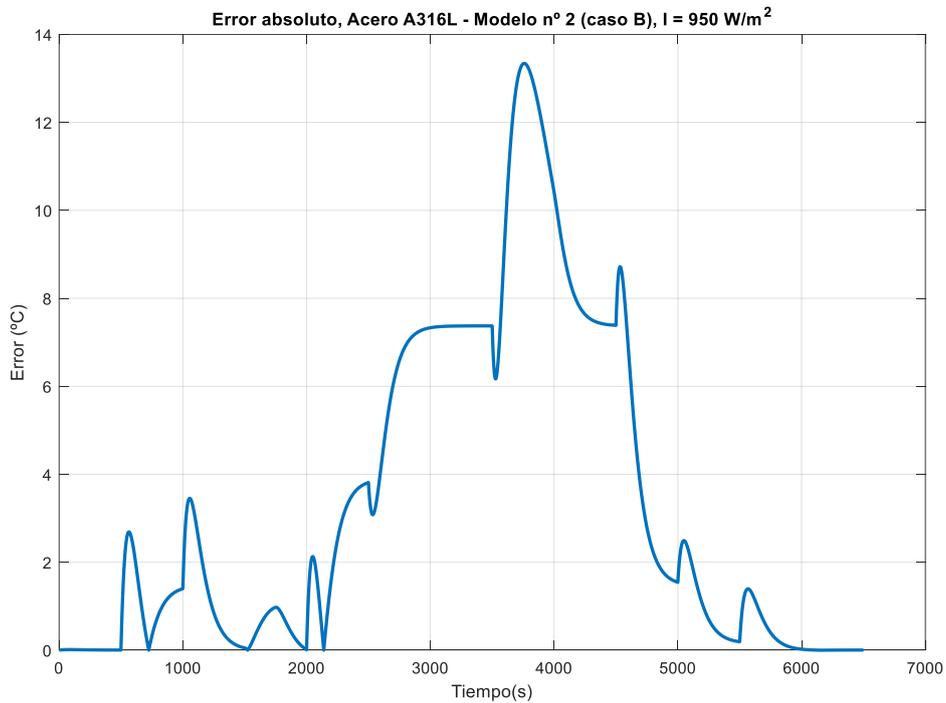


Figura 3.71. Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 (caso B) de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m².

Dada los sucesivos ensayos en este intervalo, se podría deducir que la ganancia del modelo no lineal coincidiría más con la del modelo lineal si se utilizara un valor constante de radiación solar mayor a 950 W/m².

Finalmente, se muestra en la Tabla 36 los índices de funcionamiento que ofrecen información cuantitativa sobre la calidad del modelo en cada ensayo. Como se puede observar, y se ha comentado tras cada ensayo, el error absoluto disminuye conforme aumenta la radiación constante a la que se trabaja para la apertura de la persiana introducida al modelo.

Tabla 36. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº2 (caso B) respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 3 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	30.1297	19.4863	13.3413
Error medio absoluto (°C)	10.1240	5.8987	3.3345
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	14.0079	8.3409	4.9745
R²	0.8374	0.9529	0.9851

Por último se comentan los resultados de los índices, que como se puede apreciar de forma visual también en las gráficas de error absoluto (ver Figura 3.67, Figura 3.69 y Figura 3.71), el error disminuye conforme se trabaja a una mayor radiación, evidenciando una vez más que la no linealidad del modelo es muy fuerte a apertura de persiana pequeñas y radiaciones altas, y en este intervalo, el modelo lineal está mejor diseñado para una radiación alta del rango de operación que para una radiación más pequeña, puesto que la ganancia del modelo lineal es demasiado alta y solo se compensa en el no lineal cuando aumenta la radiación.

- Validación del tercer modelo lineal, de 5 % a 9 % de apertura de persiana.

$$G_3(s) = \frac{63.125}{57s + 1}$$

Siguiendo el mismo procedimiento que en el anterior ensayo pero con este modelo (con una ganancia y constante de tiempo menor), se establecen una serie de cambios en la apertura de la persiana que se introducirán tanto al modelo lineal como al no lineal y se validará el modelo lineal para cada uno de los ensayos, a distintos valores de radiación, en concreto, a 650 W/m², 800 W/m² y 900 W/m². A continuación se muestra la entrada introducida al modelo lineal en el porcentaje de apertura de la persiana, sabiendo que el punto de operación es de 5.25 % de apertura de persiana y una temperatura ambiente de 25 °C, mientras que la radiación cambiará según el ensayo. Con estas 3 entradas del modelo se puede obtener el punto de operación de la temperatura de la muestra, a la cual se llevará previamente a cada ensayo al modelo lineal.

A continuación, en la Tabla 37, se recogen los cambios en la apertura introducidos a los modelos en estos ensayos, mientras que a su vez en la Figura 3.72, se muestra la apertura de la persiana durante el tiempo de simulación de cada ensayo.

Tabla 37. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal nº3, Acero A316-L.

Instante de simulación	Forma de la entrada	Amplitud (%) o pendiente (%/s)
500	Escalón	+0.25
1000	Escalón	+1
1500	Rampa	+(1/500)
2000	Rampa	-(0.25/250)
2500	Escalón	+1
3000	Escalón	-1
3500	Rampa	-(0.50/500)
4000	Rampa	+(0.50/500)
4500	Escalón	-0.50
5000	Escalón	-0.25
5500	Escalón	-1

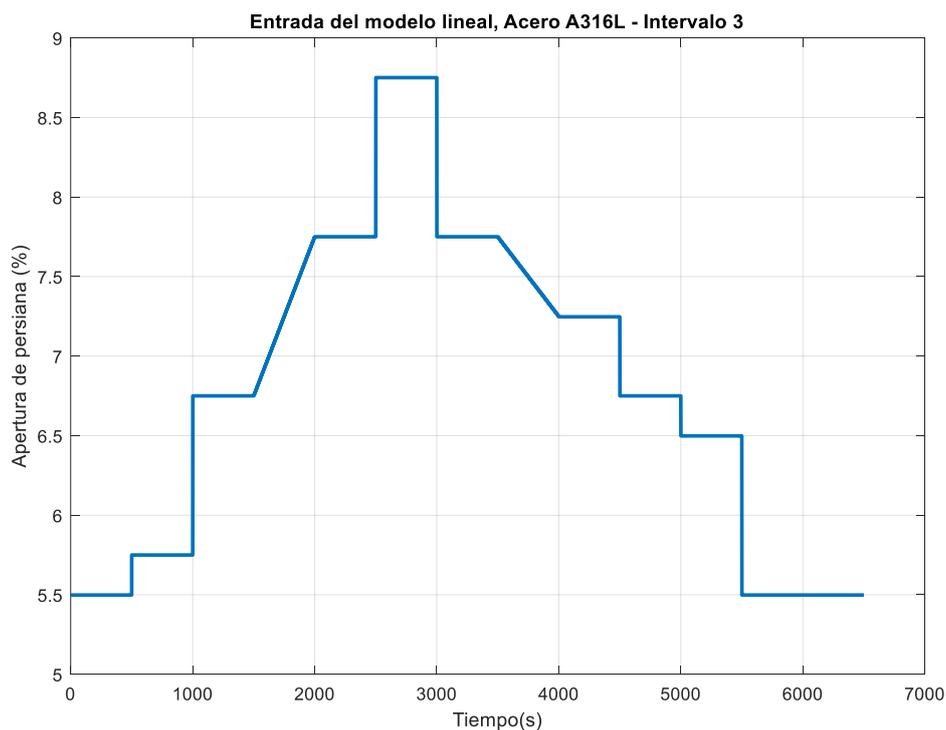


Figura 3.72. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal nº3, muestra de acero A316-L.

Primeramente, se comienza validando el modelo de este intervalo para una radiación de 650 W/m^2 , para lo cual se llevará la salida del modelo lineal al punto de operación correspondiente y se le introducirá los cambios en la apertura de la persiana descritos en la Figura 3.72 y en la Tabla 37. El resultado se muestra en la Figura 3.73. Además, se muestra posteriormente en la Figura 3.74 el error absoluto entre el modelo lineal y el no

lineal, que se hace muy pronunciado tras el escalón introducido a los 2500 segundos de simulación. En general, el error es grande conforme aumenta la apertura de la persiana, puesto que el modelo lineal tiene una ganancia muy grande (se recuerda que es la ganancia media del intervalo estudiado) que el propio modelo no lineal no tiene dado el nivel de radiación en el que se trabaja en este ensayo.

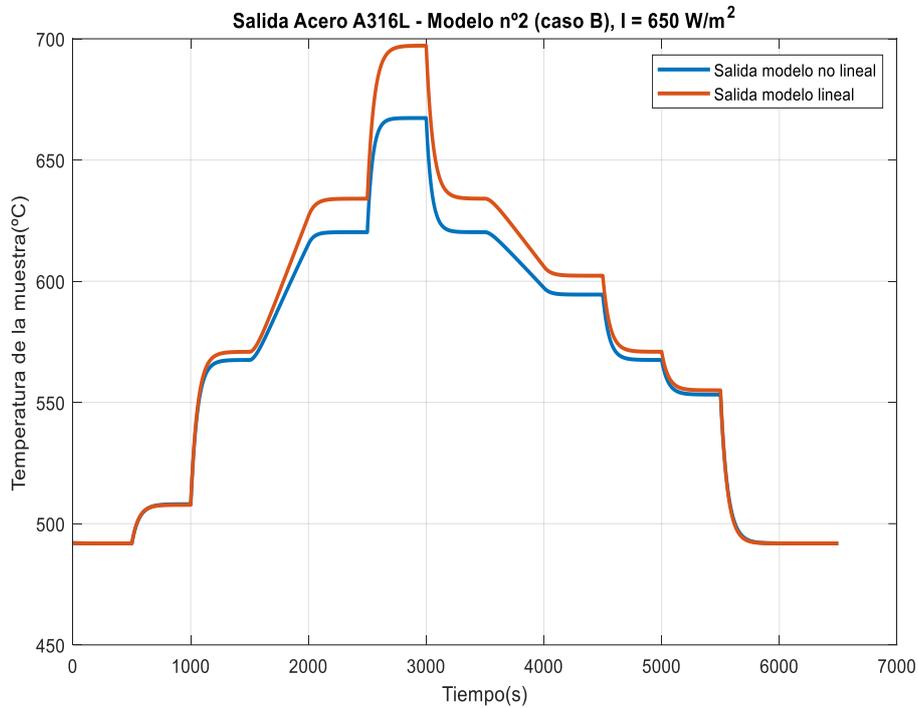


Figura 3.73. Validación modelo lineal n°3 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m².

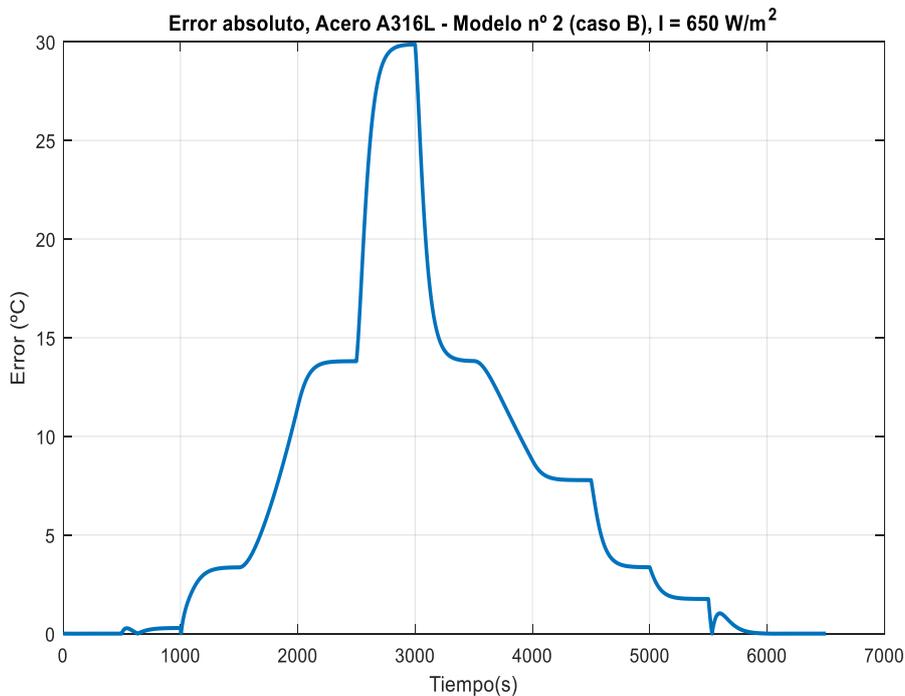


Figura 3.74. Error absoluto de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m².

Posteriormente, se aplica la misma entrada al modelo n°3 pero para una radiación constante e igual a 800 W/m^2 , dando como resultado la simulación mostrada en la Figura 3.75, y obteniéndose que el error (se puede visualizar mejor en la Figura 3.76) disminuye respecto al anterior ensayo (al igual que ocurre con los anteriores ensayos de los anteriores intervalos), aunque no lo hace de forma tan pronunciada como en los anteriores intervalos. Esto se estudiará más adelante cuando se comparen los índices de funcionamiento entre cada simulación, pero se puede empezar a deducir que la radiación empieza a influir menos en la ganancia conforme se trabaja a valores de la apertura de la persiana mayores.

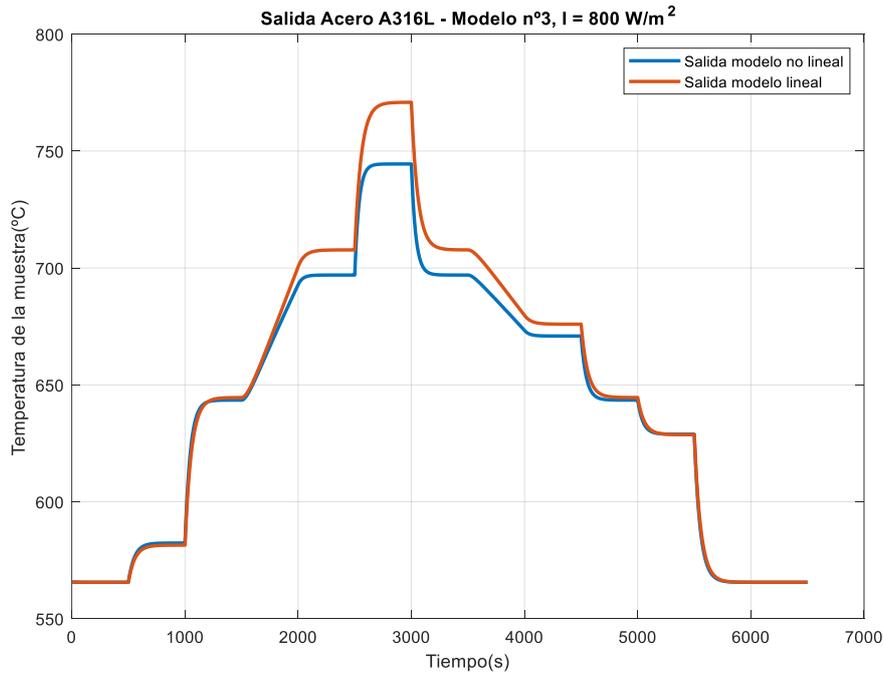


Figura 3.75. Validación modelo lineal n°3 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m^2 .

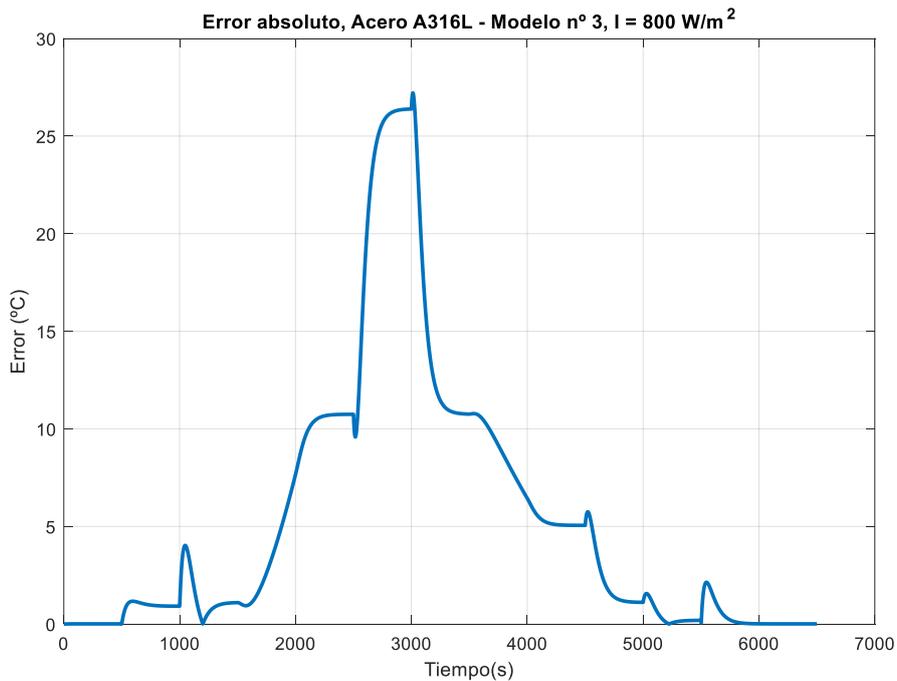


Figura 3.76. Error absoluto de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m^2 .

Por último, se le introduce al modelo no lineal una radiación constante e igual a 950 W/m^2 y se compara la salida de éste con la salida del modelo lineal para los cambios en la variable de la apertura de la persiana que se mostró con anterioridad en la Figura 3.72 y en la Tabla 37. El resultado de comparar la salida de ambos modelos se muestra en la Figura 3.77, donde se observa que la diferencia de la salida entre el modelo lineal y el no lineal es prácticamente la misma que en el anterior ensayo con la radiación igual a 800 W/m^2 . Esto se muestra mejor en la Figura 3.78 donde, al igual que para todos los ensayos anteriores, se muestra el error absoluto entre las dos salidas de los modelos, y se comprueba que la gráfica del error absoluta es prácticamente idéntica. En ambas se extrae la conclusión de que para aperturas de la persiana cercanas al límite superior del intervalo, la ganancia del modelo lineal escogida es mayor que la propia del modelo no lineal.

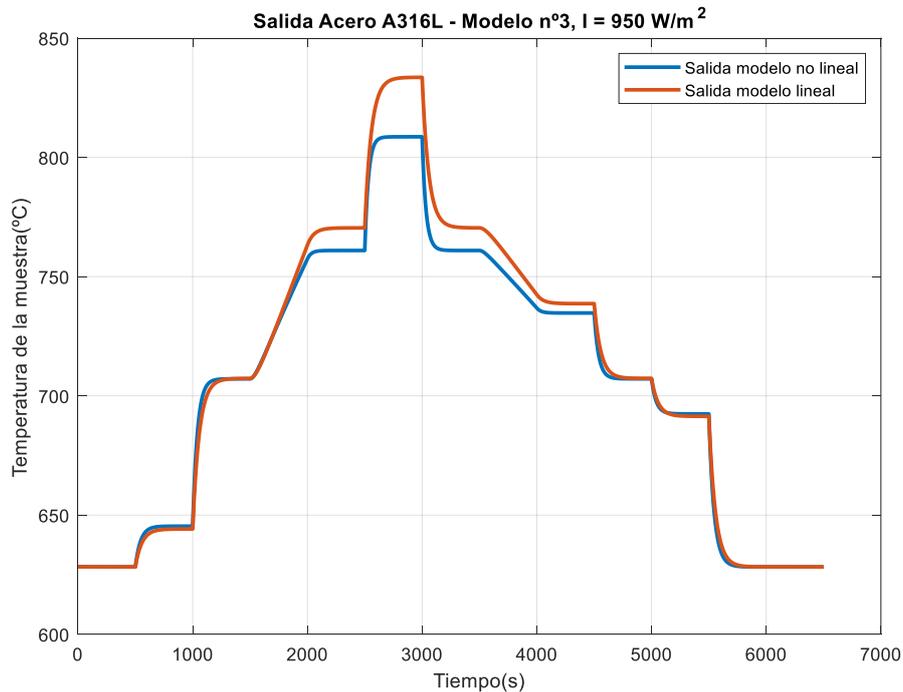


Figura 3.77. Validación modelo lineal n°3 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m^2 .

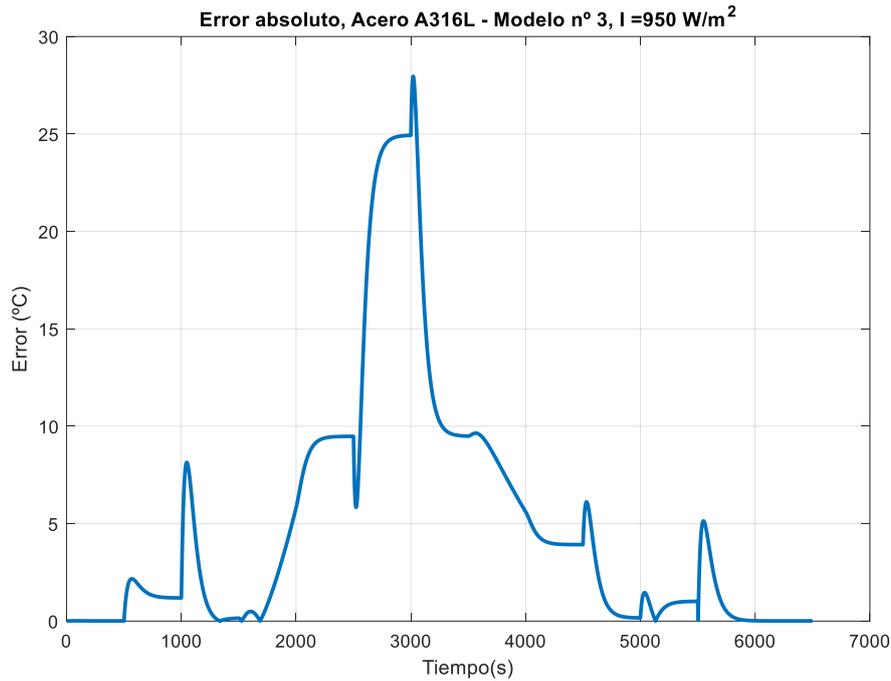


Figura 3.78. Error absoluto de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m².

A continuación, se muestran los índices de funcionamiento utilizados para validar el modelo lineal durante los distintos ensayos en la Tabla 38, donde se aprecian valores muy similares entre los distintos ensayos, advirtiendo una leve mejora en los índices conforme se trabaja a una radiación mayor, sobre todo en el paso de trabajar a 650 W/m² a 800 W/m². Esto se refleja tanto en los errores medios, como en la RMSE y en el valor de R².

Tabla 38. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°3 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 3 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	29.8674	27.2107	27.9575
Error medio absoluto (°C)	7.1044	5.4041	4.9653
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	10.7191	8.8351	8.2238
R²	0.9618	0.9752	0.9789

- Validación del modelo lineal n°4, de 9 % a 18 % de apertura de persiana.

En este cuarto intervalo, la ganancia y la constante de tiempo disminuyen, tomando la función de transferencia del modelo lineal la siguiente forma:

$$G_4(s) = \frac{34.063}{35s + 1}$$

A continuación se muestra la Tabla 39 con los valores de los cambios que se introducen en la apertura de la persiana durante las 3 simulaciones que se realizarán para validar este modelo lineal en todo su rango de operación, comenzando con un punto de operación definido por una temperatura ambiente de 25 °C, una apertura de persiana de 13.50 % y la radiación pertinente en cada ensayo.

Tabla 39. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal n°3, Acero A316-L.

Instante de simulación	Forma de la entrada	Amplitud (%) o pendiente (%/s)
500	Escalón	1.50
1000	Rampa	+(1/500)
1500	Rampa	-(1/500)
2000	Escalón	+1.50
3000	Escalón	-1
3500	Rampa	-(2.50/1000)
4500	Rampa	+(2.50/1000)
5000	Escalón	-1
5500	Escalón	-1.50
6000	Escalón	-1

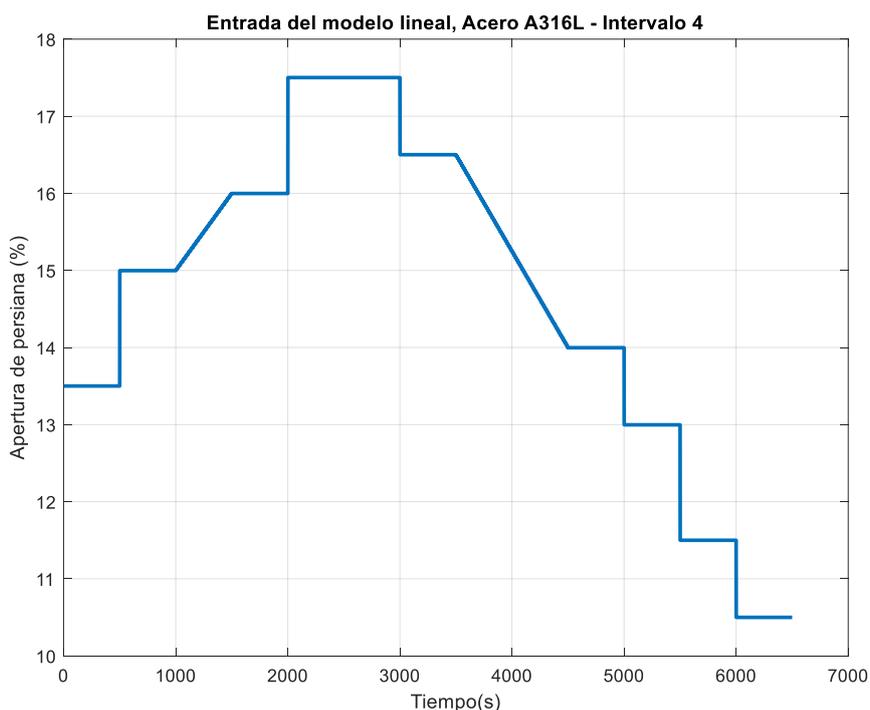


Figura 3.79. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°4, muestra de acero A316-L.

A continuación se muestran en la Figura 3.80 y Figura 3.81 los resultados de aplicar los cambios en la entrada descritos en la Tabla 39 y en la Figura 3.79 a ambos modelos con una radiación constante e igual a 650 W/m². Del análisis de estos resultados se extrae que la salida del modelo lineal posee una ganancia mayor a la del modelo no lineal para este intervalo cuando la apertura de la persiana toma valores cercanos al límite superior de 18 % de apertura de persiana, mientras que al acercarse a valores de apertura de persiana

cercanos al límite inferior las ganancias sí coinciden. Si se recuerda la Figura 3.52, se verá que el resultado es lógico puesto que la radiación influye en una menor ganancia del modelo no lineal, y la ganancia media (correspondiente a la ganancia del modelo lineal) es superior a la del modelo lineal para este nivel de radiación.

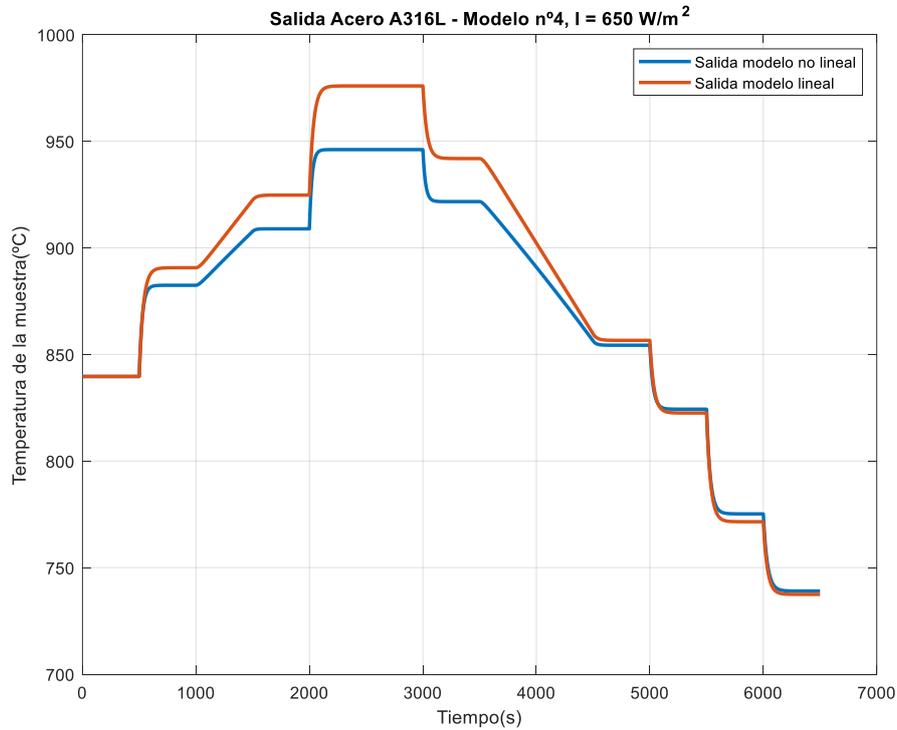


Figura 3.80. Validación modelo lineal n°4 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m².

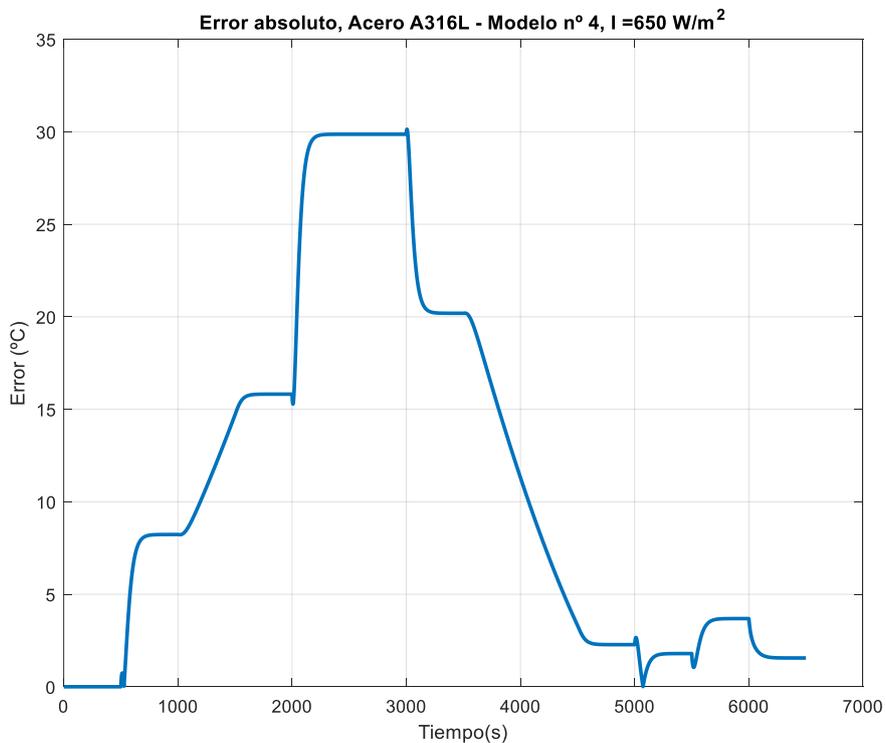


Figura 3.81. Error absoluto de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m².

Seguidamente, se muestra el resultado para una radiación igual a 800 W/m^2 en la Figura 3.82, mientras que en la Figura 3.83 se muestra el error absoluto entre la salida del modelo lineal y la del no lineal, donde se aprecia como el modelo lineal sigue poseyendo más ganancia que el modelo no lineal en este nivel de radiación mayor (aunque la diferencia se ha acortado, pero muy poco).

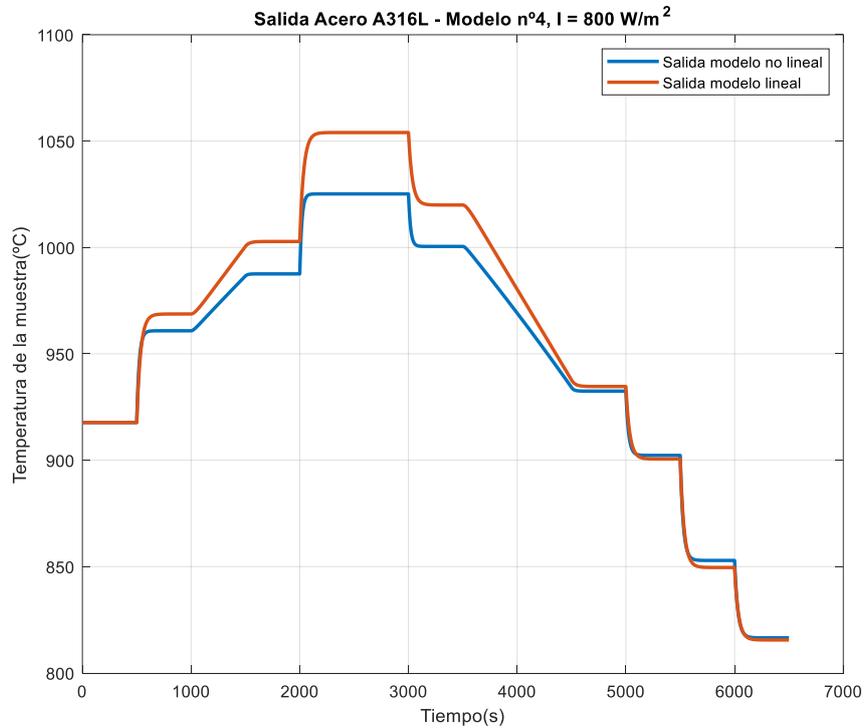


Figura 3.82. Validación modelo lineal n°4 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m^2 .

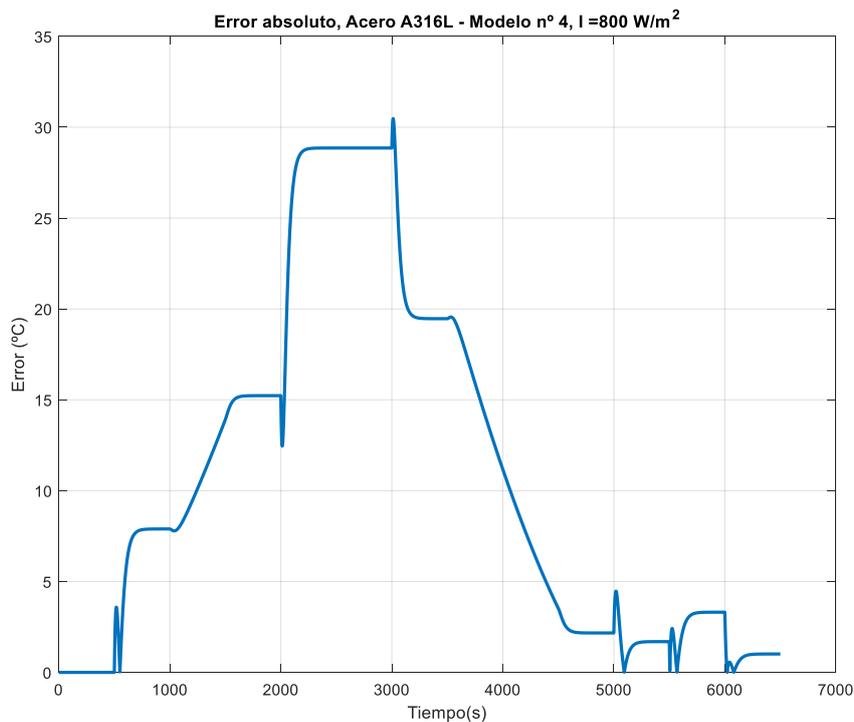


Figura 3.83. Error absoluto de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m^2 .

Por último, se obtiene el resultado de aplicar la entrada estipulada en la Figura 3.79 al modelo lineal y la no lineal para una radiación igual a 950 W/m^2 . Estos resultados se muestran en la Figura 3.84, mientras que en la Figura 3.85 se muestra el error en valor absoluto entre la salida del modelo lineal y el no lineal.

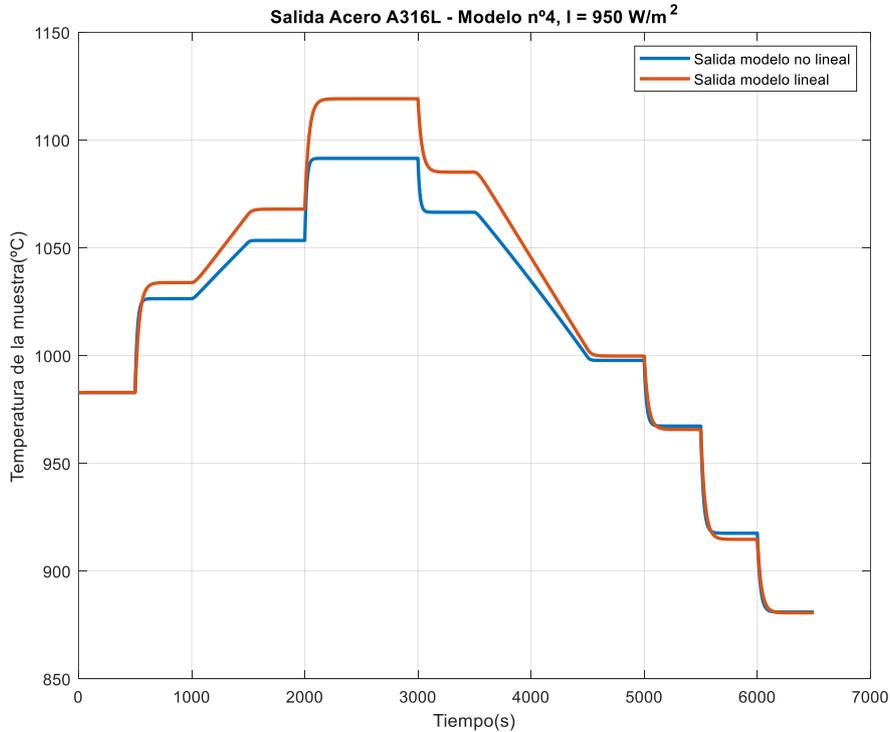


Figura 3.84. Validación modelo lineal n°4 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m^2 .

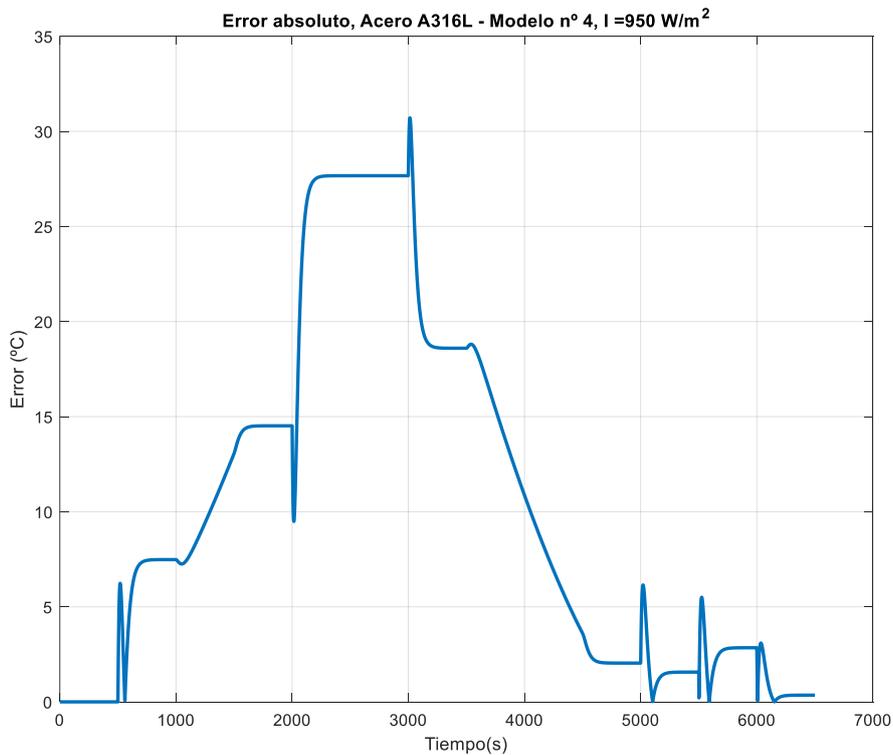


Figura 3.85. Error absoluto de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m^2 .

A continuación se muestran los índices de funcionamiento del modelo para la entrada estipulada y para distintos niveles de radiación, dando como resultado al compararlos que el modelo mejora su funcionamiento conforme se aumenta el nivel de radiación, pero no lo hace de una manera muy significativa, estando el modelo lineal bien calibrado para la parte inferior e intermedia del intervalo mientras que al alejarse de este punto de operación hacia valores superiores de porcentaje de apertura de la persiana, la calidad del modelo lineal empeora, como es lógico, dada la no linealidad del modelo con el que se compara.

Respecto de la contribución de la radiación solar en estos ensayos, se podría decir que para el rango de operación de la radiación en el que se trabaja, de 500 W/m² a 1100 W/m², los cambios en esta variable influyen muy poco en la ganancia y constante de tiempo del modelo lineal (como ya se venía advirtiendo, y que no ocurre con el primer y segundo intervalo, razón por la que se ha diseñado de esta manera el modelo lineal para todo el rango de operación).

Finalmente, se concluye con que el error medio y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (absoluto) dan resultados de error de media en torno a los 10 °C, lo que representa un buen resultado dado las temperaturas a las que se trabaja en este intervalo del rango de operación, del orden de los 900 °C a 1100 °C de temperatura. También se comenta que el valor de R² es muy bueno (superior al 94%) en todas las validaciones, y también que el error máximo entre el modelo lineal y el no lineal se ve influenciado por un pequeño desfase que se da entre las señales.

Tabla 40. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°4 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 3 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	30.1401	30.4761	30.7125
Error medio absoluto (°C)	11.1606	10.6971	10.2466
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	15.0040	14.4843	13.8843
R²	0.9366	0.9421	0.9479

- Validación del modelo lineal n°5, de 18 % a 32 % de apertura de persiana.

$$G_5(s) = \frac{19.532}{18.50s + 1}$$

Por último, se valida el modelo lineal para este último intervalo. Se observa que ahora se reduce la constante de tiempo del modelo lineal respecto del modelo anterior mientras que la ganancia del modelo se mantiene igual. Por tanto, partiendo de un punto de

operación definido por una apertura de la persiana de un 25 %, le introduce al modelo lineal y al modelo no lineal las entradas estipuladas en la Figura 3.86 y en la Tabla 41.

Tabla 41. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal n°3, Acero A316-L.

Instante de simulación	Forma de la entrada	Amplitud (%) o pendiente (%/s)
500	Escalón	+4
1000	Escalón	-2
1500	Rampa	+(3/500)
2000	Escalón	-(3/500)
2500	Escalón	+1
3000	Escalón	-3
3500	Escalón	-4
4000	Rampa	-(3/500)
4500	Rampa	+(3/500)
5000	Escalón	-2
5500	Escalón	+4
6000	Escalón	+2

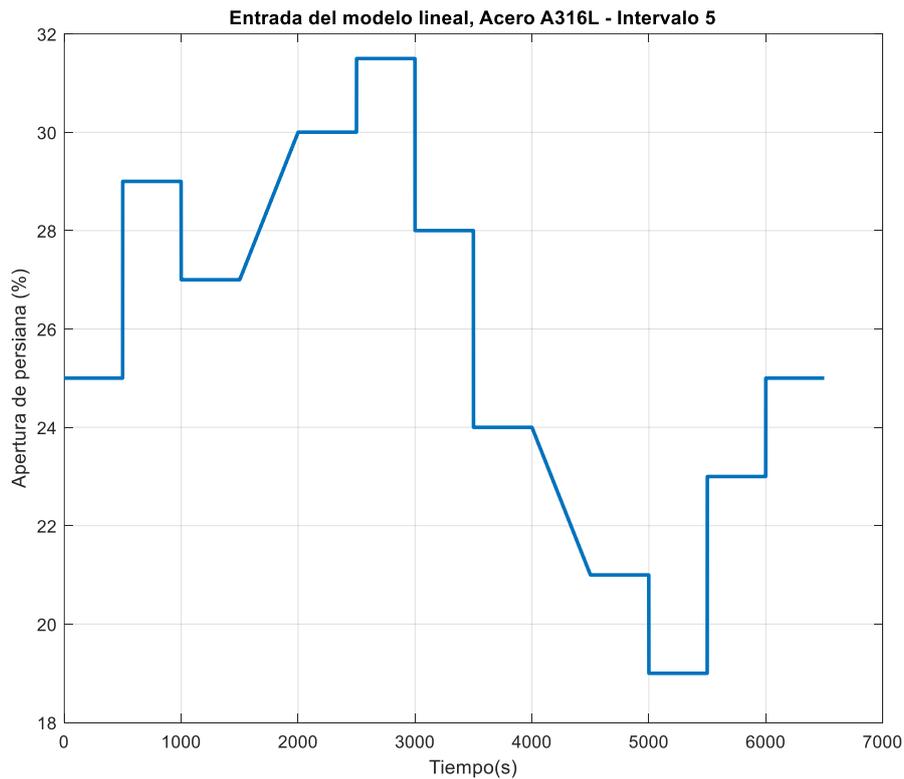


Figura 3.86. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°5, muestra de acero A316-L.

Una vez está definida la entrada a los modelos para este rango de operación, se procede a validar los modelos para niveles de radiación de 650, 800 y 950 W/m².

Primeramente, se empieza con un valor de 650 W/m^2 , obteniéndose el resultado mostrado en la Figura 3.87, que se complementa con la gráfica del error absoluto mostrada en la Figura 3.90. Tal y como se observa, la ganancia del modelo lineal es mayor que la del modelo no lineal, y se acentúa al acercarse al límites superior del 32 % de apertura de persiana (en esos valores la ganancia del modelo no lineal sigue descendiendo mientras que la del modelo lineal es estática).

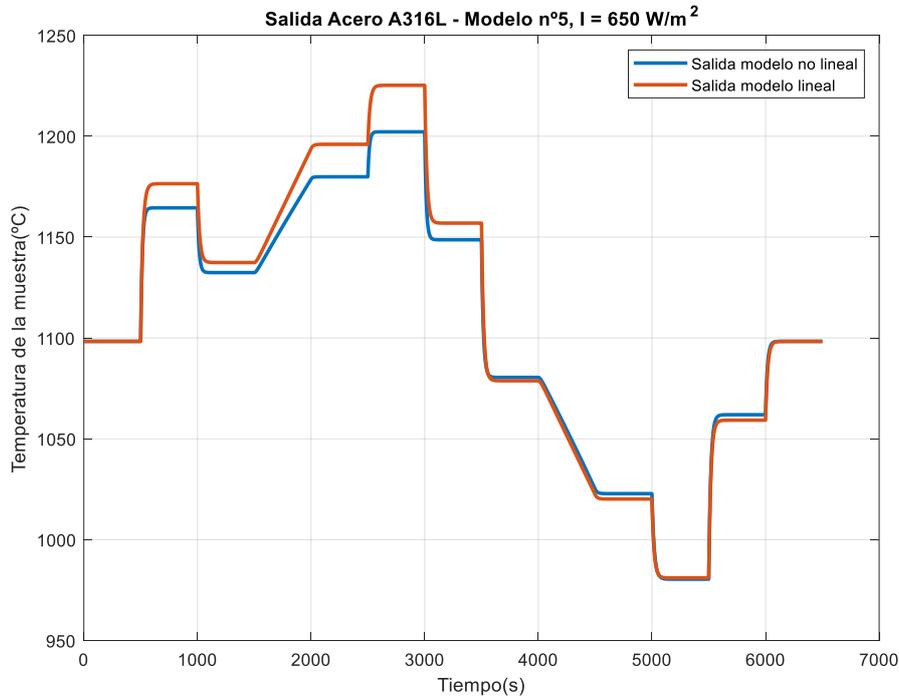


Figura 3.87. Validación modelo lineal n°5 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m^2 .

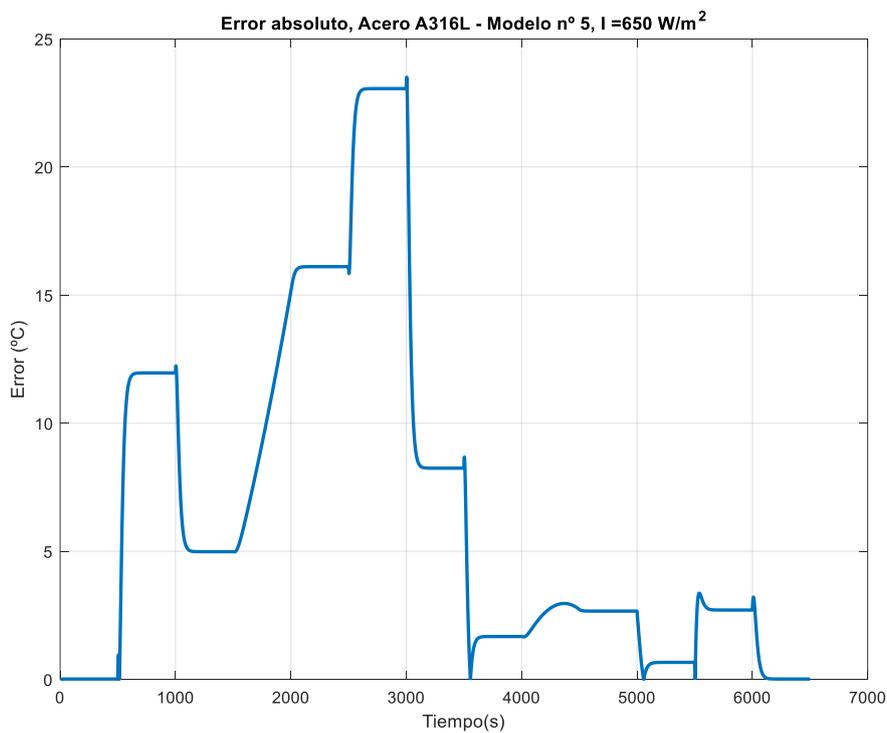


Figura 3.88. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m^2 .

A continuación, en la Figura 3.89 se muestran los resultados para un valor de radiación constante de 800 W/m^2 , mientras que en la Figura 3.90 el error en valor absoluto del modelo lineal. Como se puede observar, los resultados ya apenas se distinguen de un ensayo a otros en función de la radiación, pues tal y como se viene diciendo, ésta cada vez tiene menos influencia en los parámetros del modelo para el rango de operación en el que se está trabajando.

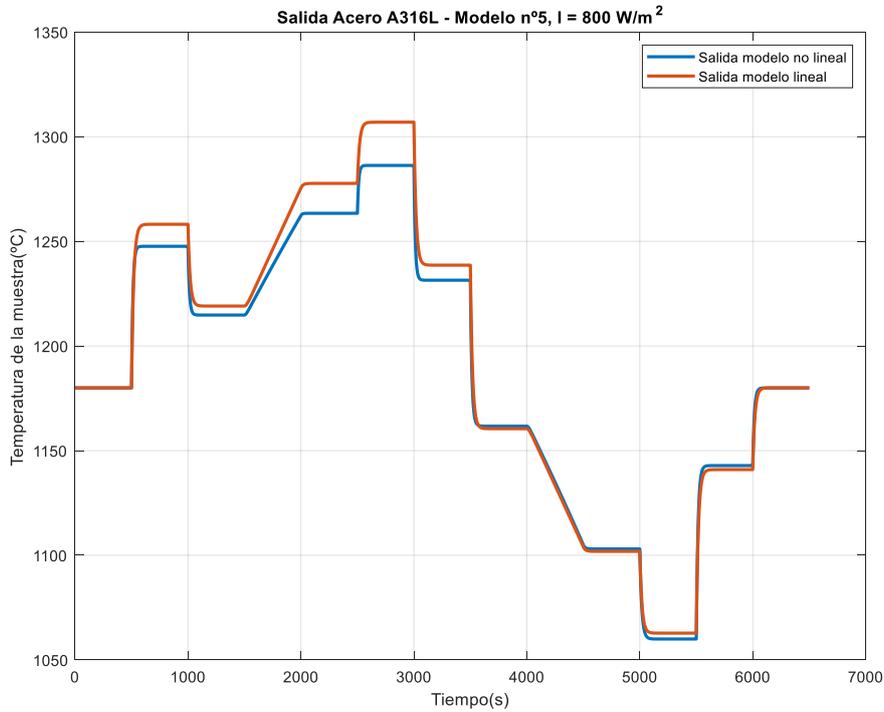


Figura 3.89. Validación modelo lineal n°5 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m^2 .

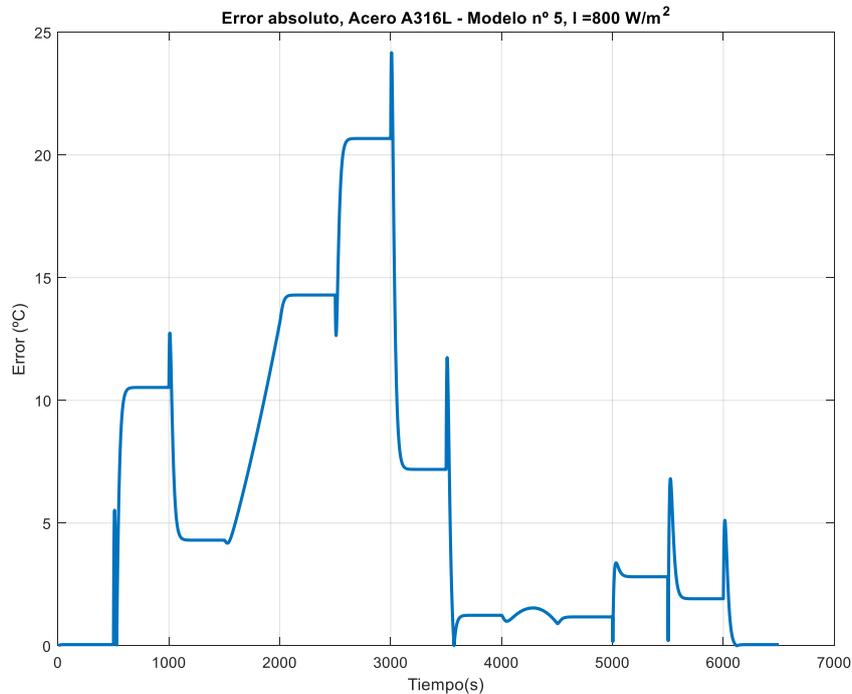


Figura 3.90. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m^2 .

Por último, se realiza el mismo ensayo pero con una radiación constante e igual a 950 W/m^2 , cuyo resultado se muestra en la Figura 3.91, mientras que en la Figura 3.92 se muestra el error en valor absoluto entre la salida del modelo lineal y la salida del modelo no lineal para este ensayo.

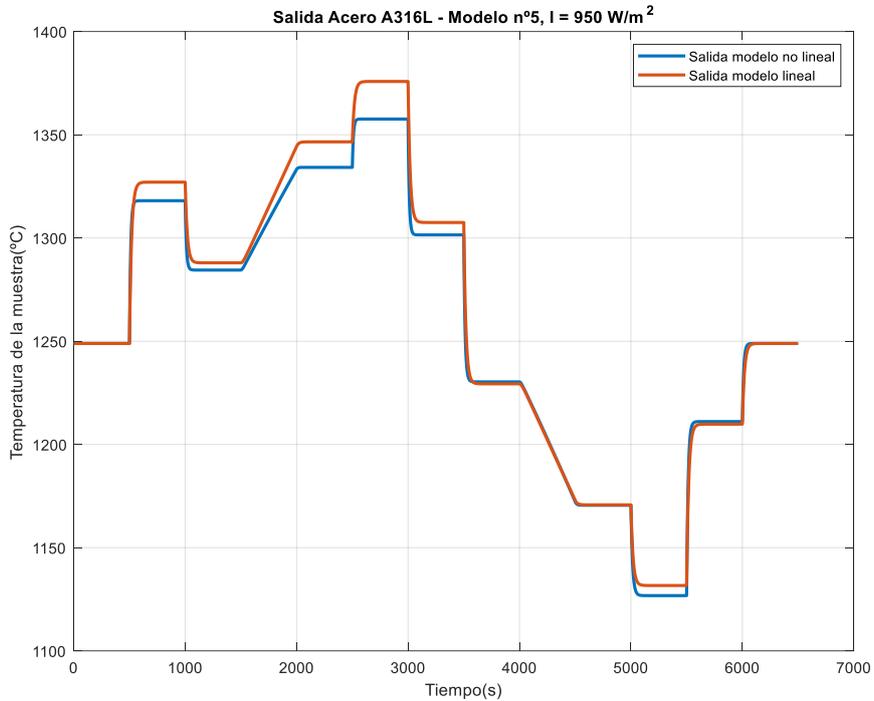


Figura 3.91. Validación modelo lineal n°5 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m^2 .

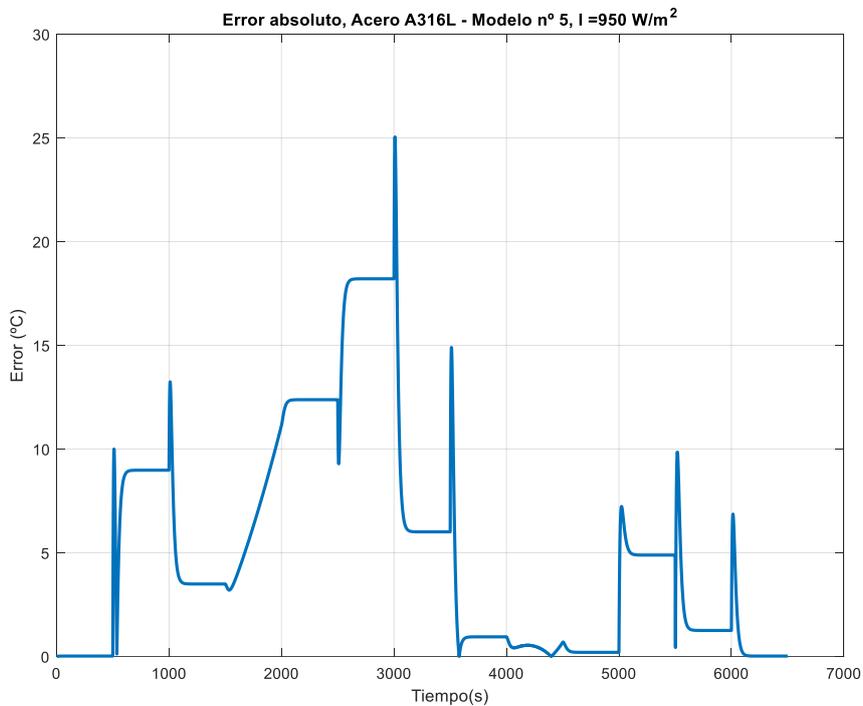


Figura 3.92. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m^2 .

Por último, se muestran los índices de funcionamiento, que tal y como estos mismos indican, existe una mejoría conforme la radiación que se utiliza para el ensayo aumenta, ya que esto proporciona mayor ganancia al modelo no lineal y hace que se vaya equiparando a la del modelo lineal. Sin embargo, se da un fenómeno de desfase entre las dos señales (se desconoce la causa) que provoca esos picos en las gráficas del error, y que perjudica el índice de funcionamiento del error máximo absoluto.

Finalmente, se comenta que el valor de R^2 es muy alto y cercano a 1 lo que demuestra buenos resultados de modelado en este intervalo, al igual que los bajos valores de error medio absoluto y RMSE, menores a 10 °C, que es un valor realmente bajo dadas las temperaturas de trabajo de estos ensayos, del orden de los 1000 °C.

Tabla 42. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº5 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 3 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	23.5055	24.1696	25.0475
Error medio absoluto (°C)	6.5094	5.7962	5.1213
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	9.4075	8.4039	7.4789
R²	0.9777	0.9829	0.9870

- Validación del modelo lineal nº6, de 32% al 100% de apertura de persiana.

$$G_6(s) = \frac{9.8485}{9s + 1}$$

Para este último modelo, se prepara una serie de cambios en la entrada de la apertura de la persiana como la que se muestra en la Tabla 43 y se representa de forma gráfica en la Figura 3.93, partiendo de un punto de operación de un 66 % para la apertura de la persiana.

Tabla 43. Cambios en la apertura de la persiana para distintos instantes de tiempo, ensayo de validación de modelo lineal nº3, Acero A316-L.

Instante de simulación	Forma de la entrada	Amplitud (%) o pendiente (%/s)
500	Escalón	+10
1000	Escalón	+10
1500	Rampa	+(9/500)
2000	Escalón	-(9/500)
2500	Escalón	+1
3000	Escalón	-3
3500	Escalón	-4
4000	Rampa	-(3/500)
4500	Rampa	+(3/500)

5000	Escalón	-2
5500	Escalón	+4
6000	Escalón	+2

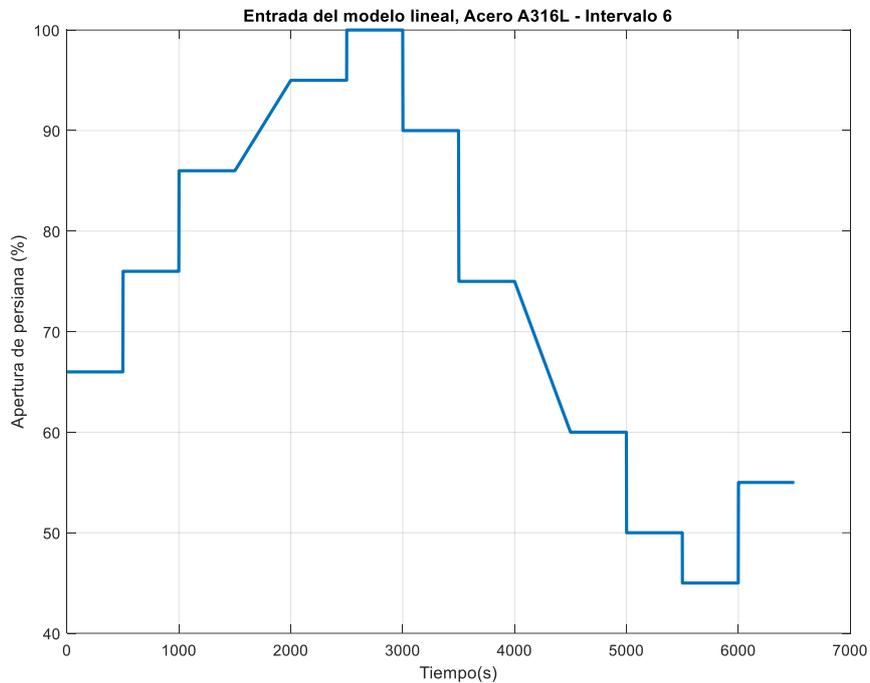


Figura 3.93. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°6, muestra de acero A316-L.

A continuación, al igual que en los demás intervalos, se procede a mostrar los resultados para distintos niveles de radiación, empezando por 650 W/m^2 , tal y como se muestra en la Figura 3.94 y Figura 3.95, donde se aprecia a que altos valores de apertura de la persiana, el error aumenta considerablemente puesto que la ganancia del modelo no lineal es demasiado pequeña comparada con la del modelo lineal. Esto es debido en gran parte a lo grande que es este intervalo, que abarca todo el rango de operación de la radiación junto con dos tercios del rango de operación de la apertura de la persiana, lo que provoca que en regiones del rango de operación lejanas a la zona de baja apertura de persiana del intervalo (donde está mejor calibrado dada la forma curva de la no linealidad de la ganancia y la constante de tiempo), el error aumente considerablemente, alcanzando los cientos de grados.

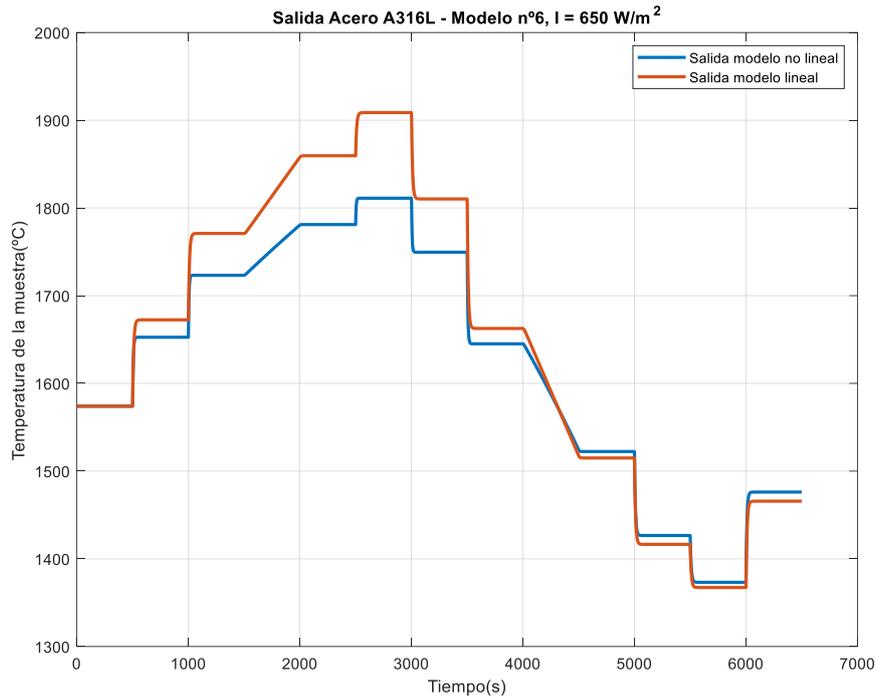


Figura 3.94. Validación modelo lineal n°6 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m^2 .

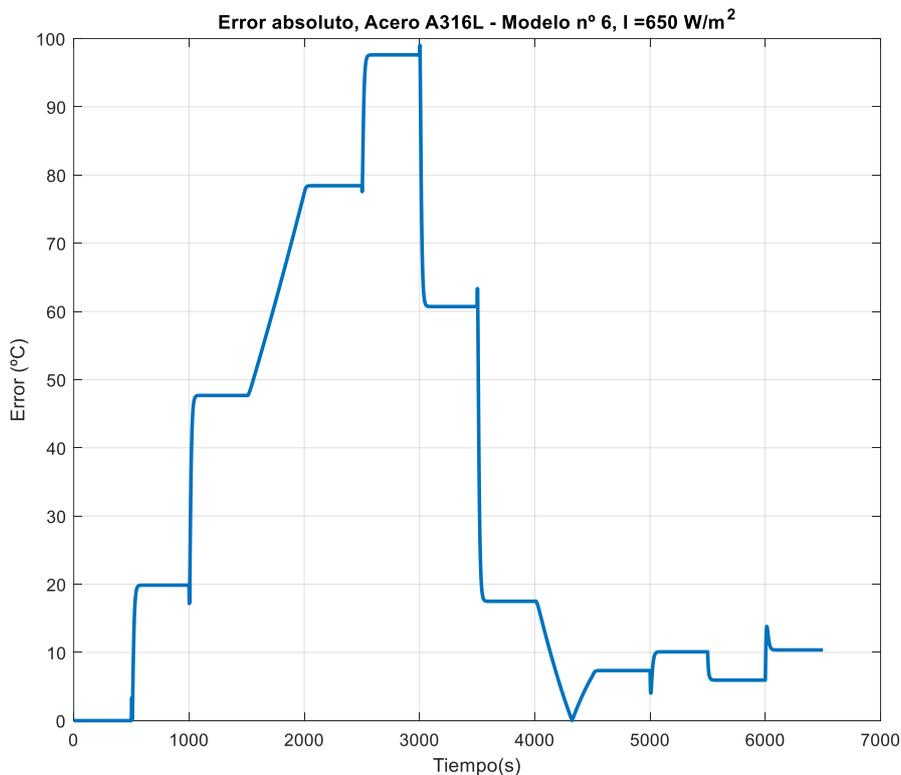


Figura 3.95. Error absoluto de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de acero A316-L, radiación 650 W/m^2 .

A continuación, se muestra el resultado para una radiación de 800 W/m^2 en la Figura 3.96 y Figura 3.97, donde se aprecia que el error apreciablemente apenas varía respecto del

anterior ensayo, puesto que la radiación influye bien poco en la ganancia y constante de tiempo del modelo no lineal.

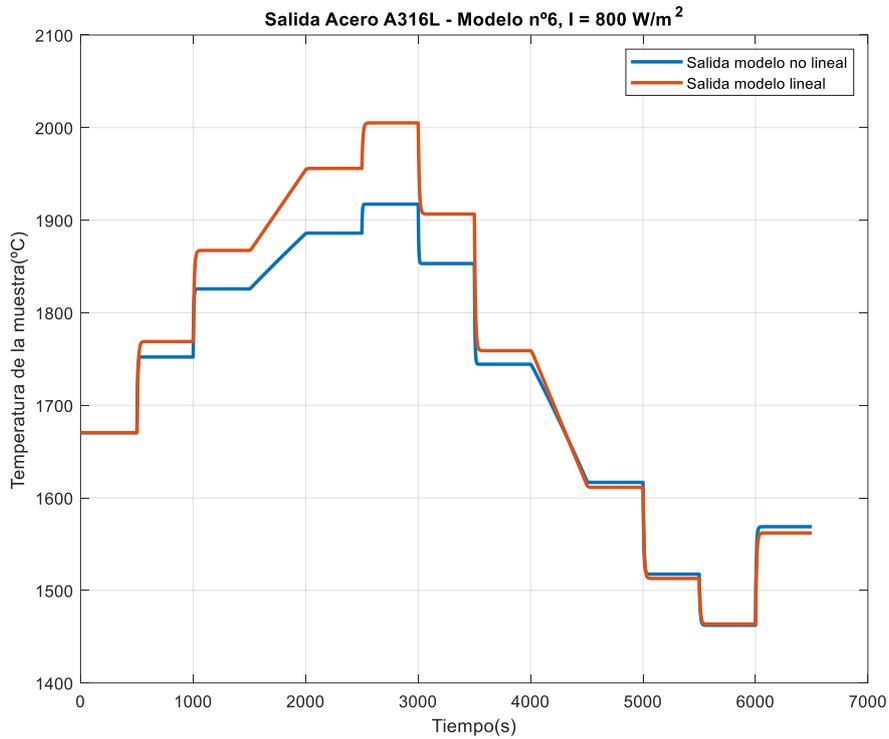


Figura 3.96. Validación modelo lineal n°6 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m².

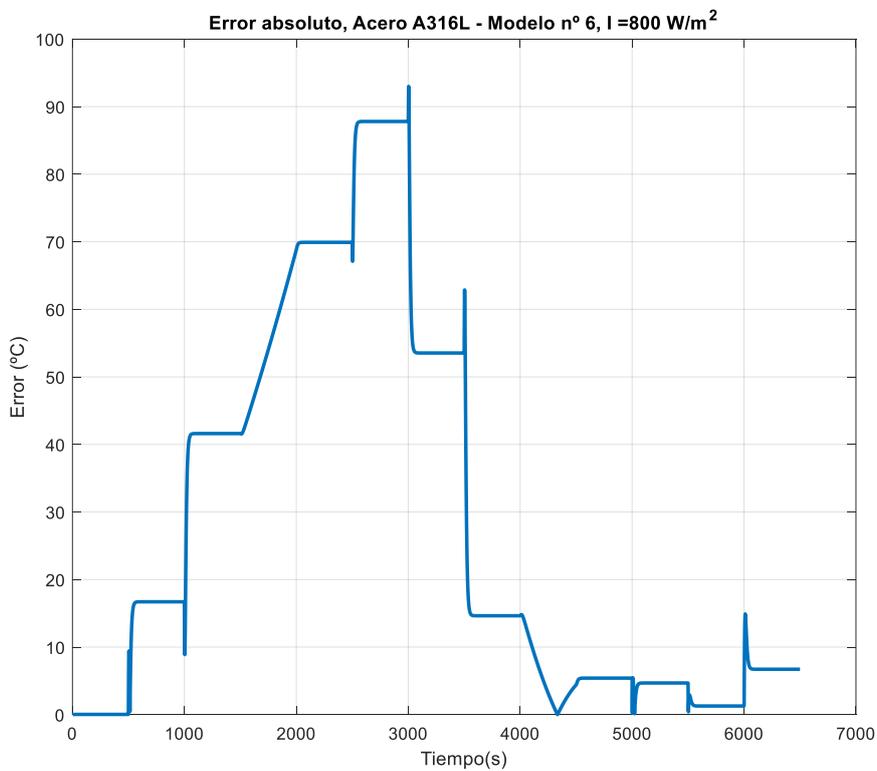


Figura 3.97. Error absoluto de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de acero A316-L, radiación 800 W/m².

Finalmente, se muestra el resultado para una radiación constante e igual a 950 W/m^2 en la Figura 3.98, mientras que en la Figura 3.99 se muestra el error absoluto entre el modelo lineal y el modelo no lineal. Al igual que ocurre con las últimas simulaciones, el modelo lineal n° 6 trabaja mejor a bajas aperturas de la persiana que a altas, lo cual se debe a la distribución de la ganancia en el intervalo, donde se concentran los valores altos a bajas a apertura de persiana (parte menos lineal del intervalo) mientras que a alta apertura de persiana la superficie de la ganancia y la constante de tiempo es más plana y por tanto se ve perjudicada a la hora de utilizar un “modelo lineal medio” del intervalo.

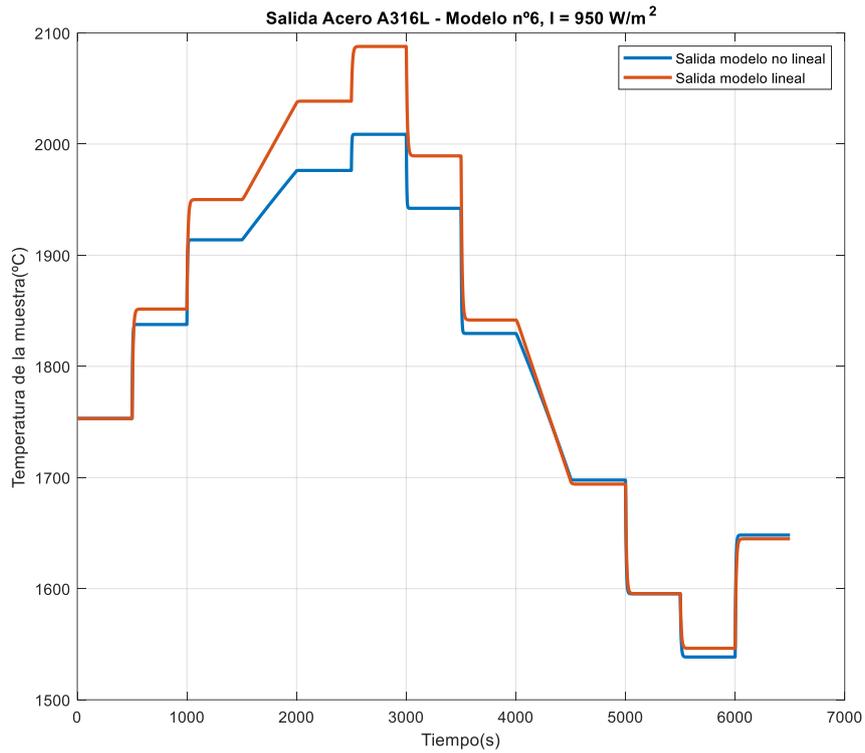


Figura 3.98. Validación modelo lineal n°6 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m^2 .

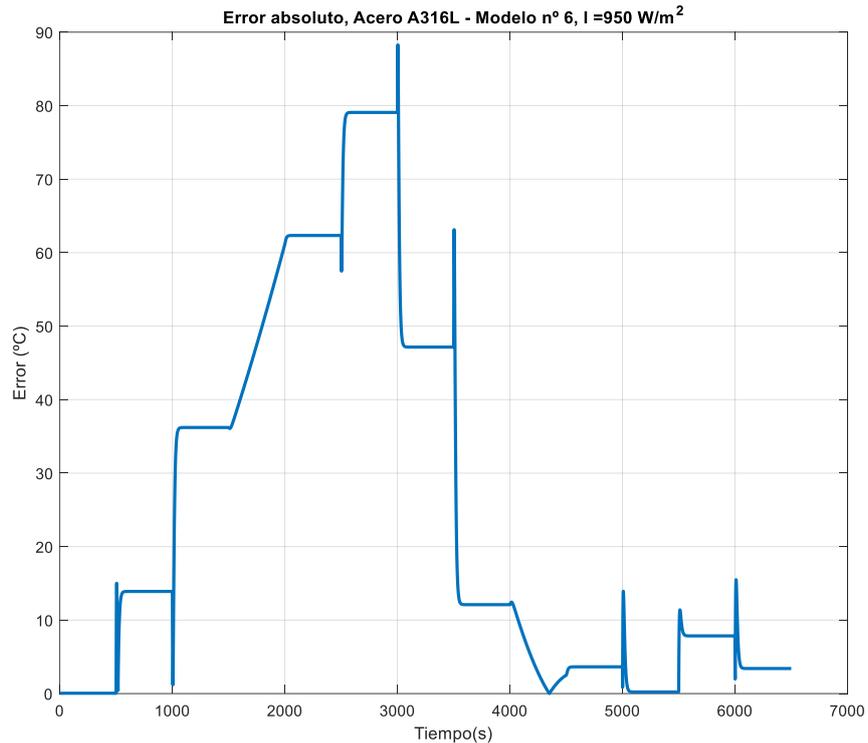


Figura 3.99. Error absoluto de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de acero A316-L, radiación 950 W/m².

Por último, los índices de funcionamiento se muestran a continuación en la Tabla 44, donde se observa que los errores máximos que se dan durante las simulaciones son muy grandes, y teniendo en cuenta las gráficas del error se puede deducir que, como ocurría en el anterior intervalo y como se viene ya explicando, el modelo lineal funciona peor en aperturas de persiana muy grandes, lo cual es lógico dado el gran rango de operación que se quiere abarcar con un solo modelo.

Los valores de error medio y el RMSE muestran que en general el error medio no es muy grande dadas las temperaturas a las que se está trabajando, alrededor de los 2000°C, y el valor de R² muestra una buena sintonía entre el modelo lineal y el no lineal, que mejora conforme se trabaja a mayor radiación, lo cual es lógico puesto que significa un aumento en la ganancia del modelo no lineal y por tanto se acerca más a la del modelo lineal de este intervalo.

Tabla 44. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°6 respecto del modelo no lineal, para el acero A316-L en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 3 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	99.0317	92.9965	88.2720
Error medio absoluto (°C)	32.6395	27.9265	24.6326
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	45.2856	40.1363	35.7208
R²	0.8899	0.9199	0.9407

Como conclusión, con este último intervalo se han obtenido resultados buenos a bajas aperturas de persiana mientras que valores no muy buenos a altas aperturas de la persiana; esto se podría solucionar añadiendo más intervalos como se hizo al principio al ahora de obtener los intervalos de ganancia y constante de tiempo para la muestra de acero A316-L, ya que al tener más intervalos la precisión de los modelos es más alta. Sin embargo, se ha decidido simplificar y dejar este número de modelos pese a esta mala respuesta a altas aperturas de persiana ya que en el horno no se suele trabajar a tan altas temperaturas, y así se puede simplificar la carga de trabajo en esta parte del TFM.

3.2.2 Zirconia blanca

A continuación, se resumen en la Tabla 45 los valores de los parámetros que conforman el modelo no lineal para la muestra de zirconia blanca:

Tabla 45. Resumen de los parámetros característicos de la muestra de zirconia blanca que conforman el modelo.

Parámetros característicos de la muestra de zirconia blanca	Valor	Unidades
m_s	0.2	(Kg)
c_s	669	J/(Kg·K)
S_s	0.0785	m ²
α_a	0.52486	-
α_c	136.73179	W/(m ² ·K)
α_e	0.42492	-

Como se hizo con el acero, a la hora de obtener la dependencia de la radiación solar y la apertura de la persiana con la temperatura de la muestra, y en consecuencia, con la

ganancia y constante de tiempo del modelo lineal, se ha trabajado con un calor específico de 670, correspondiente al calor específico a 200 °C según se explicó en la parte de resultados durante la calibración del modelo no lineal con los datos de la muestra de zirconia en la Tabla 16, ya que por lo general no se trabajará a 25 °C.

A continuación, se repetirá el mismo procedimiento seguido con el acero A316-L anteriormente para obtener los modelos lineales, por lo que se hará una explicación menos exhaustiva que entonces. Se enumeran los pasos seguidos a continuación para la obtención y validación de los modelos lineales que abarcan todo el rango de operación de la pieza:

- Primeramente, se mostrará la dependencia de la ganancia y la constante de tiempo del modelo lineal con la apertura de la persiana y la radiación,
- Luego se establecerán los intervalos en torno a una variación de la ganancia y la constante de tiempo de un 25 %, y en base a dicha división del rango de operación, se establecerán tantos modelos como sea necesario para abarcar todo el rango de operación comentado.
- Una vez establecidos los intervalos del rango de operación en función de sus entradas de radiación y apertura de la persiana, se definirán los valores de ganancia y constante de tiempo medias para cada intervalo que conformarán los modelos lineales pertinentes.
- Se mostrarán los resultados de validación de los modelos lineales junto a los índices de funcionamiento de cada simulación.

A continuación se muestra para la muestra de zirconia blanca la distribución de la ganancia y de la constante de tiempo, en la Figura 3.100 y Figura 3.101 respectivamente. Estos resultados son, si se comparan con la muestra de acero A316-L, realmente ilustrativos de lo que cambia la dinámica del modelo respecto de la muestra con la que se trabaja, puesto que la ganancia que presenta el modelo para la zirconia blanca es mucho menor de la ganancia del modelo para la muestra de acero A316-L, y lo mismo exactamente ocurre con la constante de tiempo.

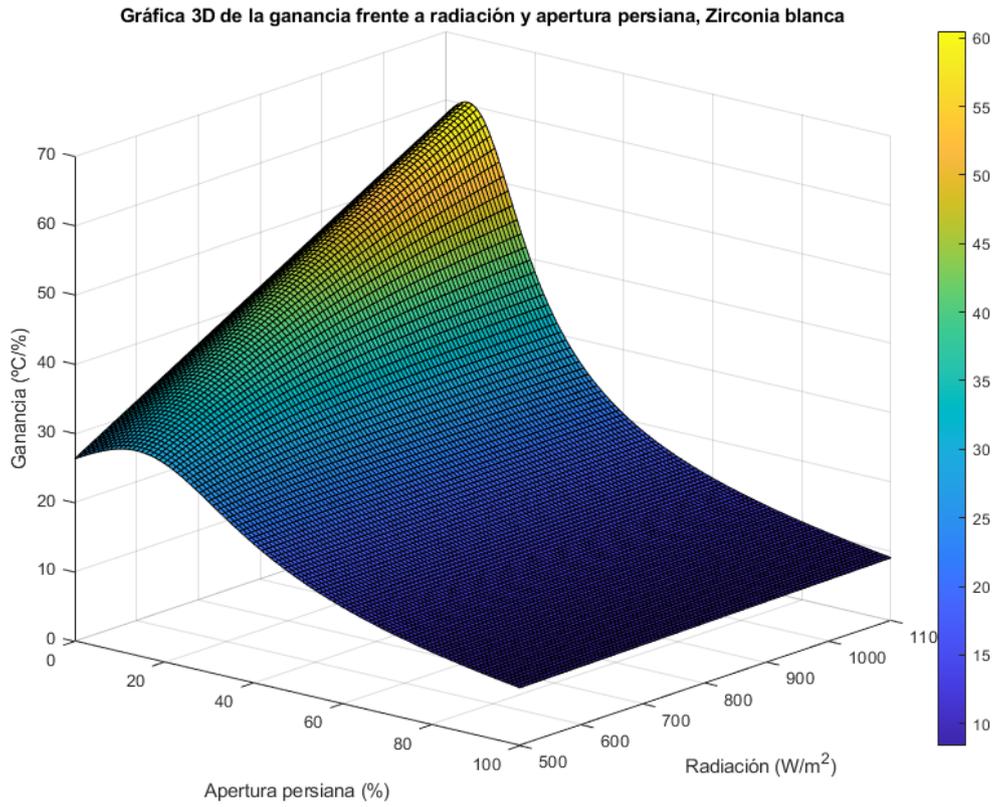


Figura 3.100. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia (k) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de zirconia blanca.

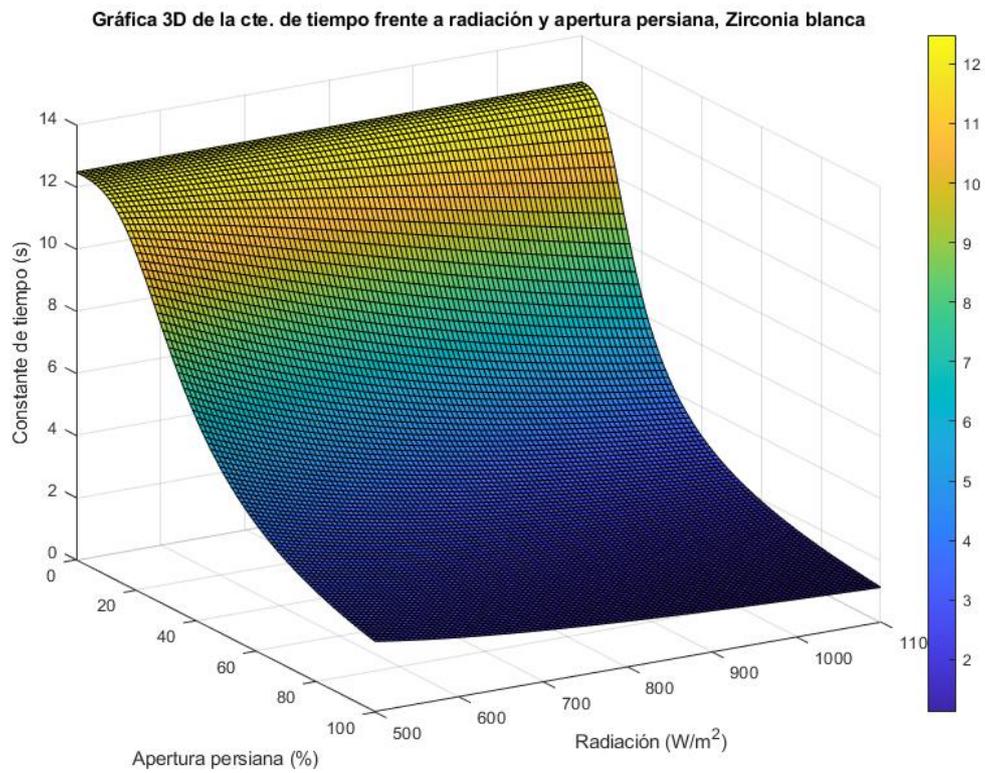


Figura 3.101. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo (τ) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de acero zirconia blanca.

Una vez conocida la relación de la ganancia y la constante de tiempo para la muestra de zirconia en función de la radiación solar y de la apertura de la persiana, se pueden establecer los intervalos para esta muestra. Sabiendo que la constante de tiempo varía desde valores aproximados de 1 a 13 segundos aproximadamente, y que la ganancia lo hace desde aproximadamente valores de 60 a 8, se aplican los cortes con planos paralelos al plano XY a la superficie de ganancia y constante de tiempo con el objetivo de obtener los intervalos del rango de operación al igual que se hizo con la muestra de acero. Estos cortes son 4 en un principio, para luego adicionar más cortes para el intervalo de menor altura en el eje Z (ganancia o constante de tiempo, en su caso) y obtener más precisión en este intervalo que abarca la mayor parte del rango de operación, al igual que ocurría con la pieza de acero A316-L. Este resultado se muestra para la ganancia en la Figura 3.102, donde al tener esta muestra de zirconia un rango de operación más pequeño que el del acero, se ha introducido un solo corte en el intervalo inferior en vez de dos, como se hizo con el acero A316-L.

Analizando la gráfica se observa, al igual que ocurría con la pieza de acero, que el intervalo de mayor altura en el eje Z solo será válido para radiaciones entre 836 W/m² (que se aproximará a 800 W/m²). Sin embargo, para el siguiente intervalo se considerará que se trabaja en todo el rango de operación de la radiación, pese a que corte en 586 W/m² el plano de Z=34.

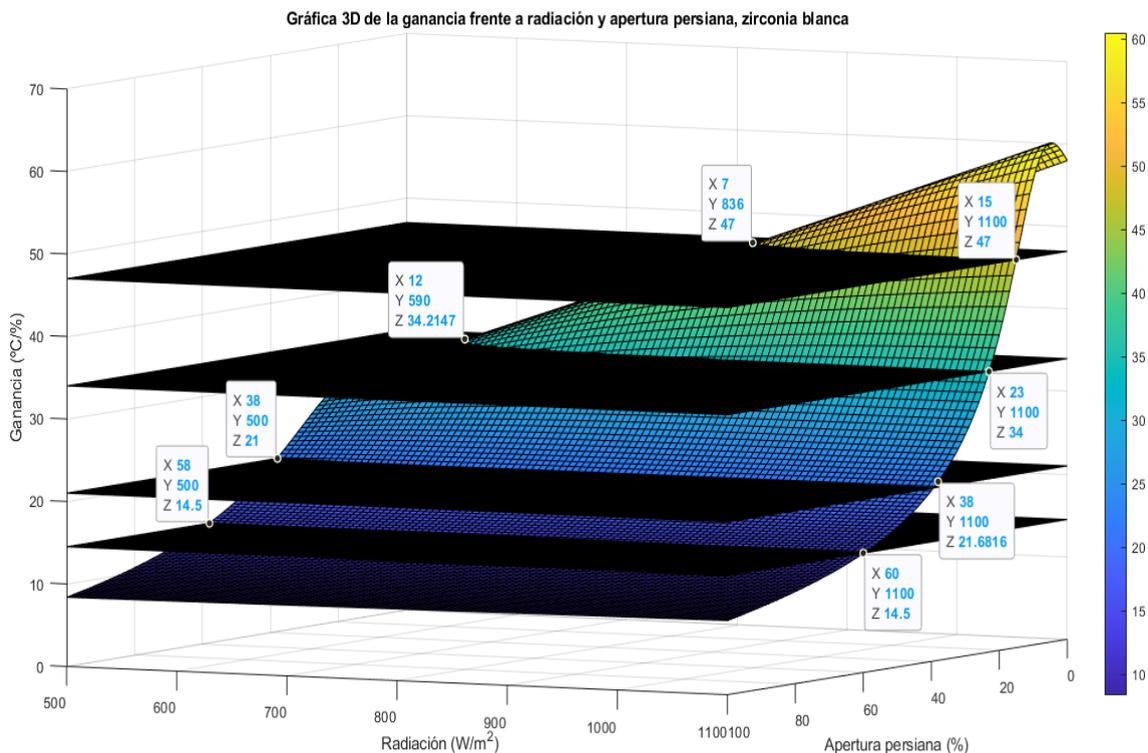


Figura 3.102. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m²), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de zirconia blanca.

Dada la partición del rango de operación en los intervalos mostrados, se resume en la Tabla 55 los intervalos escogidos para la ganancia:

Tabla 46. Intervalos del rango de operación para la apertura de la persiana establecidos para la muestra de zirconia blanca y ganancia media de cada intervalo.

Nº de intervalo	Límites de intervalos de ganancia (°C/%)		Límites de intervalos de apertura de persiana (%)		$k_{U,media}$ (°C/%)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	60	47	0	15	53.50
2	47	34	15	23	40.50
3	34	21	23	38	27.50
4	21	14.50	38	60	17.75
5	14.50	8	60	100	11.25

A continuación, se realiza el mismo procedimiento para la constante de tiempo, realizando cortes perpendiculares al eje Z en la superficie en tres dimensiones de la variable:

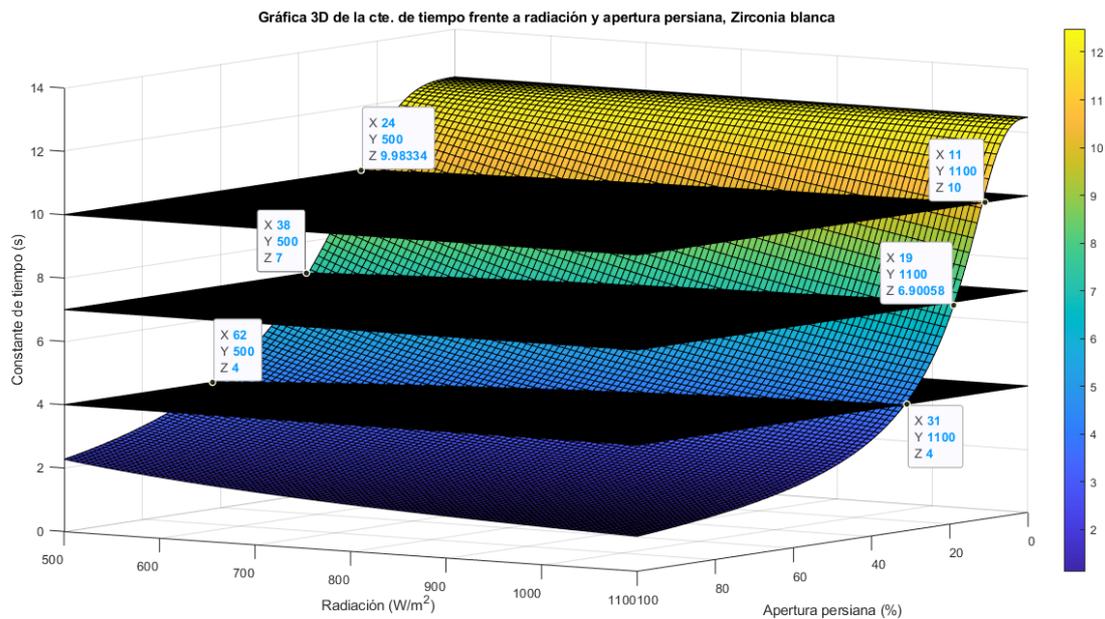


Figura 3.103. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m²), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de zirconia blanca.

Es notorio que los cortes realizados en la superficie de la constante de tiempo con los planos no son líneas rectas sino curvas, dada la superficie en 3 dimensiones, por lo que los intervalos que se escogen son aproximados intentando obtener resultados óptimos, haciendo además que coincidan en la medida lo posible con los intervalos establecidos por la ganancia. Como se puede observar, dados los pequeños intervalos en los que se trabaja, esta vez no se ha decidido aplicar un corte extra en el intervalo de menor altura pues no se ha considerado necesario, al contrario de lo que ocurriría con el acero A316-L.

Por tanto, dada la distribución obtenida por los cortes en el eje Z y lo comentado anteriormente, se fijan a su vez en la Tabla 47 los intervalos para la constante de tiempo.

Tabla 47. Intervalos del rango de operación establecidos para la muestra de zirconia blanca, y constante de tiempo media para cada uno.

Nº de intervalo	Límites de intervalos de constante de tiempo (s)		Límites de intervalos de apertura de persiana (%)		τ_{media} (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	13	10	0	15	11.50
2	10	7	15	38	8.50
3	7	4	38	60	5.50
4	4	1	60	100	2.50

Finalmente, se resumen en la Tabla 48 los modelos lineales estimados para la muestra de zirconia blanca, que quedan en un total de seis modelos tras cruzar los datos de la Tabla 46 y la Tabla 47.

Tabla 48. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de acero zirconia blanca.

Nº de modelo	Apertura de persiana (%)		Radiación (W/m ²)		Ganancia, k_U (°C/%)	Constante de tiempo, τ (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
1	0	15	1100	800	53.50	11.50
2	0	15	800	500	40.50	11.50
3	15	23	Todo el rango		40.50	8.50
4	23	38	Todo el rango		27.50	8.50
5	38	60	Todo el rango		17.75	5.50
6	60	100	Todo el rango		11.25	2.50

Una vez establecidos los intervalos, se validan los modelos para cada uno de ellos, utilizando a su vez los índices de funcionamiento para medir la calidad de los modelos diseñados.

- Validación del primer modelo lineal, rango del 0 % a 15 % de apertura de persiana.

$$G_1(s) = \frac{53.50}{11.50s + 1}$$

Antes de empezar a validar, se recuerda al lector que este modelo solo es válido para radiaciones de 800 W/m² a 1100 W/m². Por tanto, para la señal de entrada dada por la Figura 3.104, se realizarán dos ensayos a dos niveles de radiación distintos, 900 W/m² y 1000 W/m², valores intermedios de radiación en el intervalo, y se obtendrán los índices de funcionamiento.

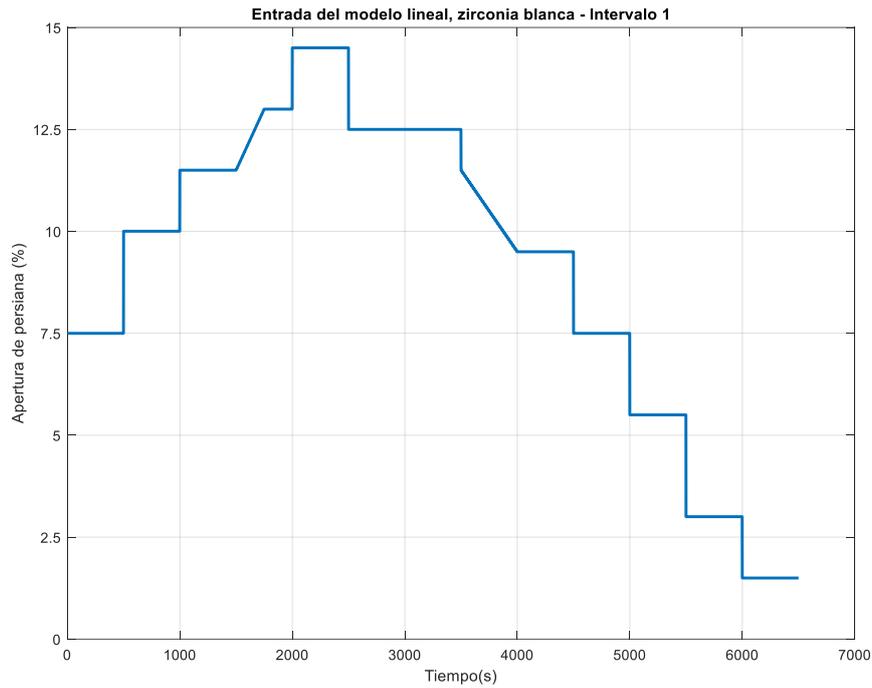


Figura 3.104. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°1 y 2, muestra de zirconia blanca.

A continuación, el resultado para un nivel de radiación igual a 900 W/m^2 se muestra en la Figura 3.105, siendo la Figura 3.106 el error absoluto entre la salida del modelo lineal y la salida del modelo no lineal. Se observa que el modelo lineal se comporta adecuadamente, y su comportamiento empeora a apertura de persiana mayores puesto que el modelo no lineal en dicho rango de operación y para la radiación dada no posee tanta ganancia como el modelo lineal establecido para el valor medio del intervalo.

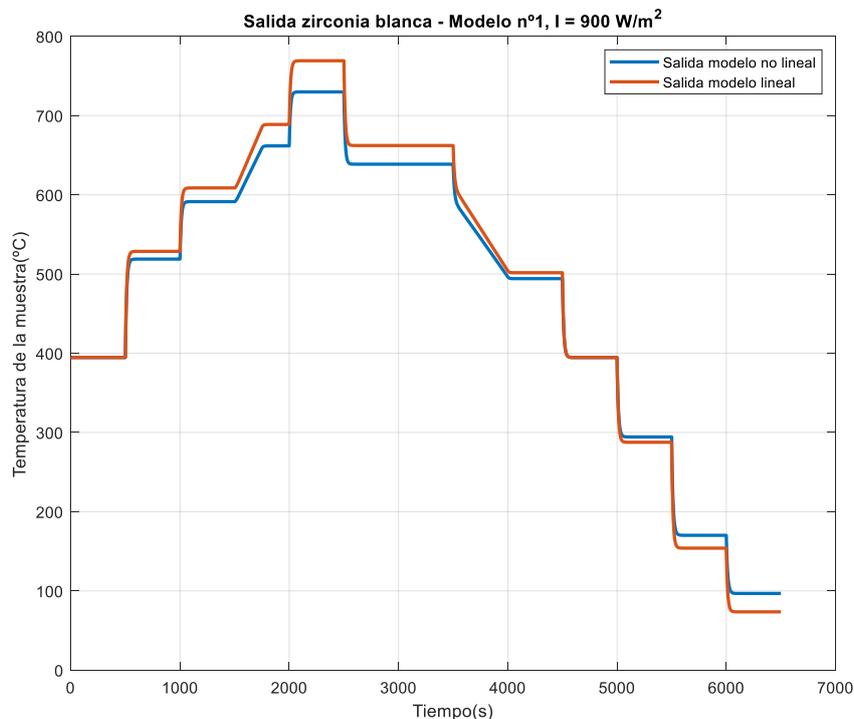


Figura 3.105. Validación, modelo lineal n°1 de la muestra de zirconia blanca, radiación 900 W/m^2 .

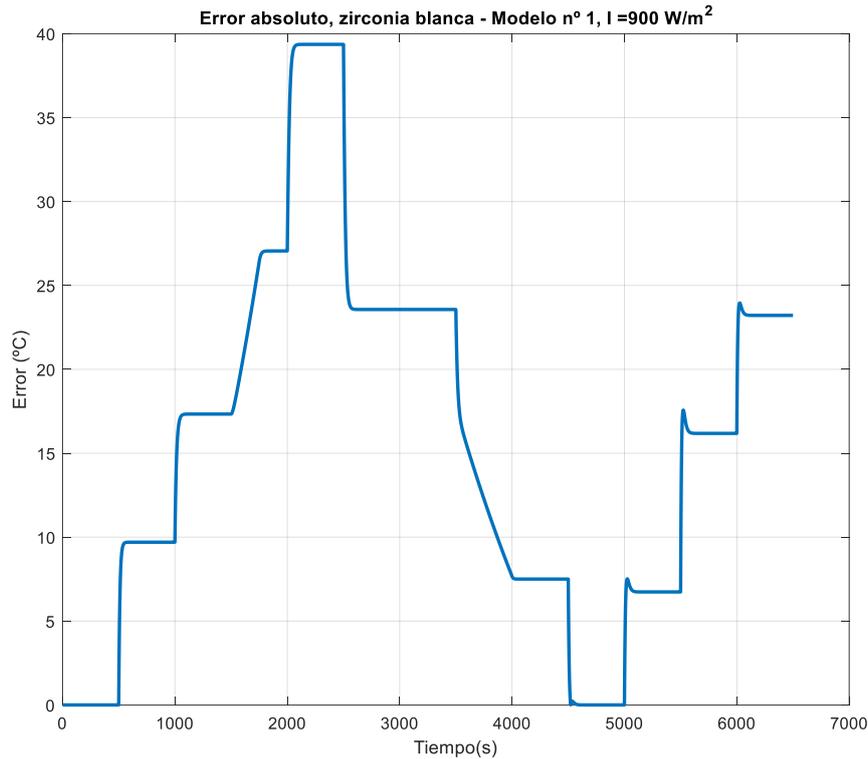


Figura 3.106. Error absoluto de validación, modelo lineal nº1 de la muestra de zirconia blanca, radiación 900 W/m^2 .

Por último, el resultado para un nivel de radiación igual a 1000 W/m^2 se muestra en la Figura 3.107, mientras que el error en valor absoluto se muestra en la Figura 3.108. Por otra parte, se observa que el ajuste del modelo lineal con el no lineal en este nivel de radiación es casi perfecto, siendo la ganancia del modelo lineal todavía superior a aperturas de persiana grandes a la del modelo no lineal para dicho nivel de radiación. Es deducible que si se aumentara el nivel de radiación, la ganancia del modelo no lineal sobrepasaría a la del modelo lineal en aperturas de persiana grandes.

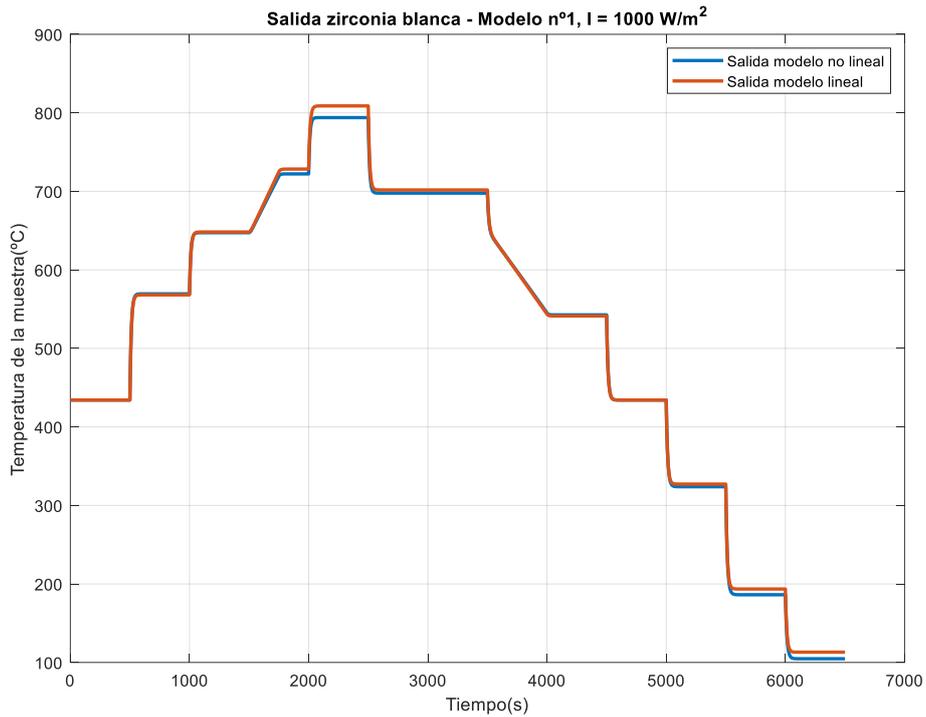


Figura 3.107. Validación, modelo lineal n°1 de la muestra de zirconia blanca, radiación 1000 W/m².

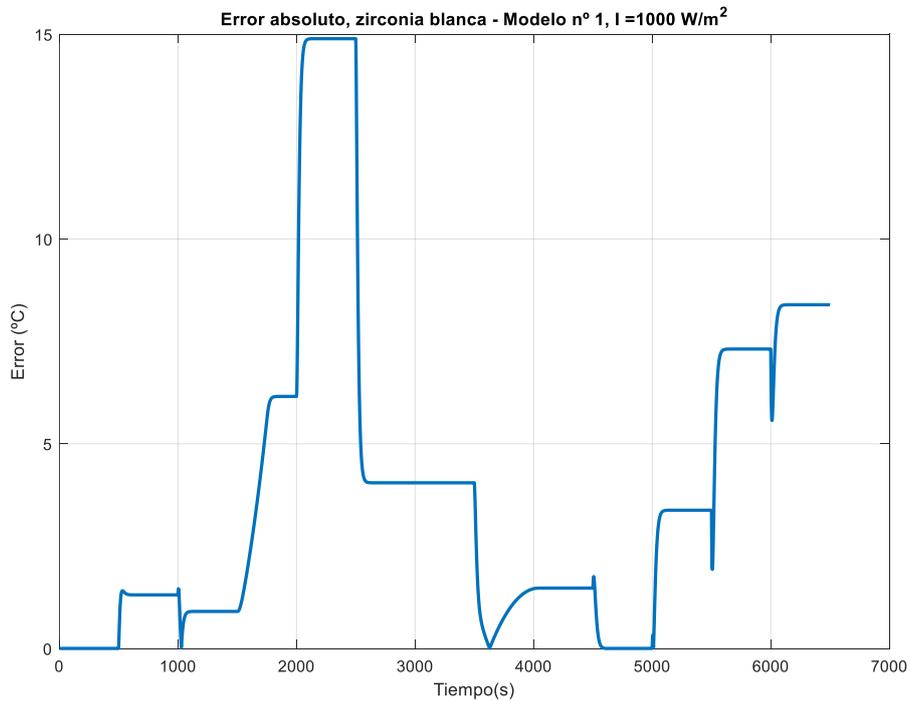


Figura 3.108. Error absoluto de validación, modelo lineal n°1 de la muestra de zirconia blanca, radiación 1000 W/m².

Examinando los índices de funcionamiento que se muestran a continuación en la Tabla 49, se deduce que la radiación tiene una influencia muy grande en los parámetros del modelo en este rango de operación del intervalo. También se puede comentar dados los

resultados que el modelo lineal está muy bien ajustado a ese nivel de radiación con el modelo no lineal, ya que el valor de R^2 , el error medio absoluto y el RMSE devuelven valores para los índices muy buenos en este ensayo.

Tabla 49. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°1 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 900 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 1000 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	39.3638	14.8931
Error medio absoluto (°C)	15.6741	3.8904
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	19.0406	5.6100
R²	0.9894	0.9992

- Validación del segundo modelo lineal, rango del 0 % a 15 % de apertura de persiana.

$$G_2(s) = \frac{40.50}{11.50s + 1}$$

Antes de empezar a validar, se recuerda al lector que este modelo solo es válido para radiaciones de 500 W/m² a 800 W/m². Por tanto, para la señal de entrada dada por la misma Figura 3.104, ya que se trata del mismo intervalo de apertura de persiana, se obtiene las salidas de los modelos para radiaciones constantes de 600 W/m² y 700 W/m², valores medios de los intervalos dados.

Se empieza mostrando el resultado para una radiación constante de 600 W/m² en la Figura 3.109, mientras que el error absoluto entre la salida del modelo lineal y el no lineal se muestra en la Figura 3.110, donde se observa que el modelo lineal posee mayor ganancia que el modelo no lineal.

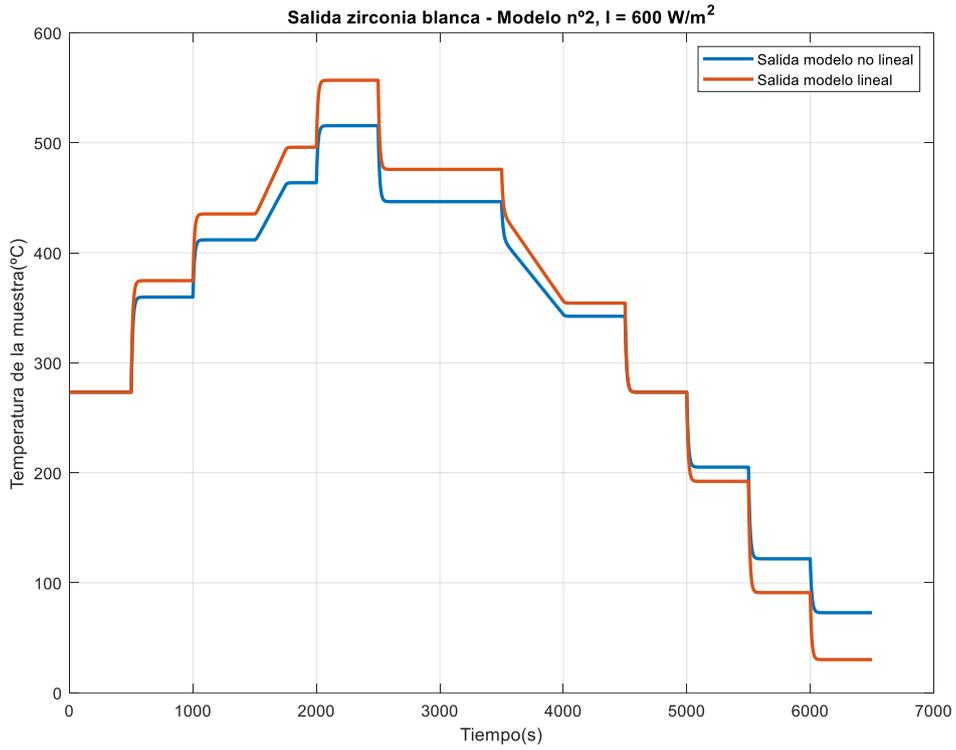


Figura 3.109. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de zirconia blanca, radiación 600 W/m².

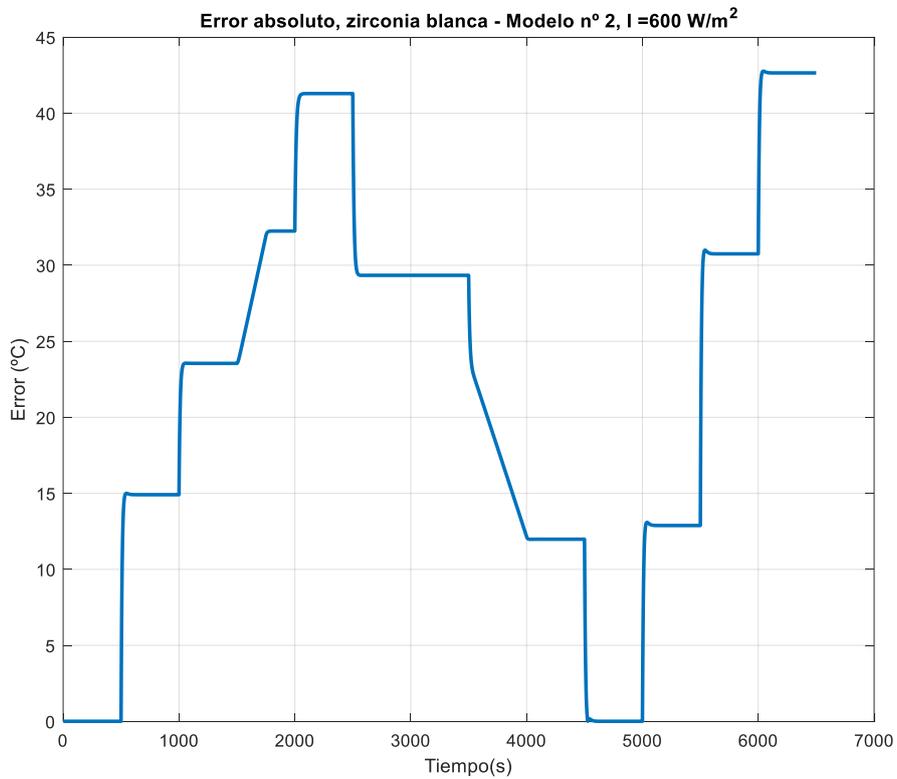


Figura 3.110. Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de zirconia blanca, radiación 600 W/m².

Se muestra a continuación el resultado para un valor de radiación constante de 700 W/m^2 en la Figura 3.111 y Figura 3.112, donde se puede observar como el ajuste del modelo lineal con el no lineal es bastante certero, siendo ambas salidas prácticamente idénticas, sobre todo para la zona central del intervalo.

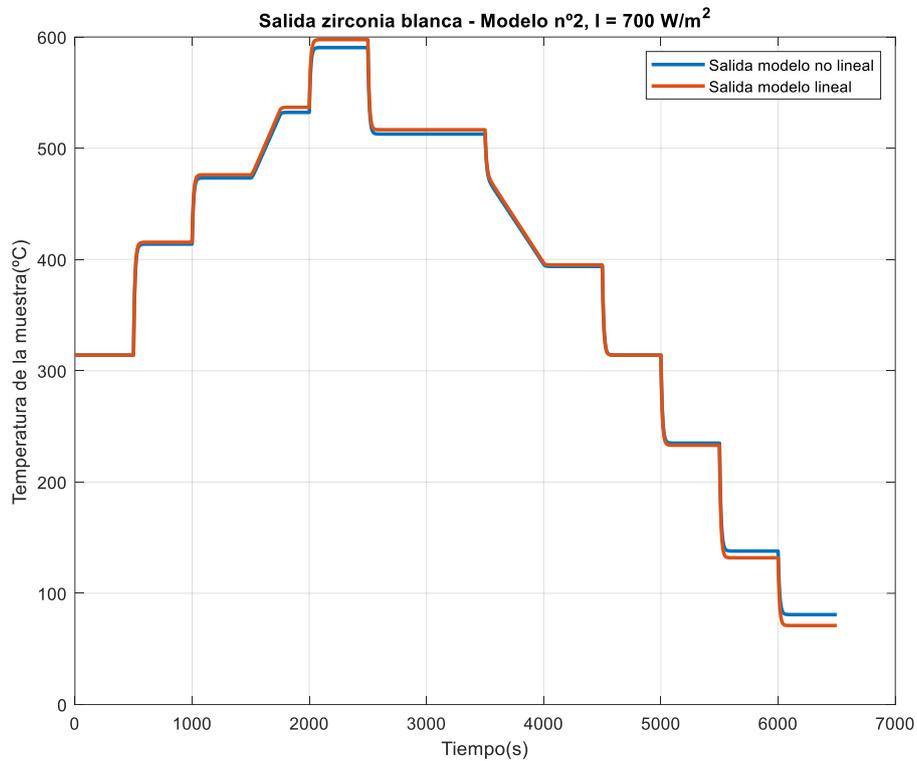


Figura 3.111. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de zirconia blanca, radiación 700 W/m^2 .

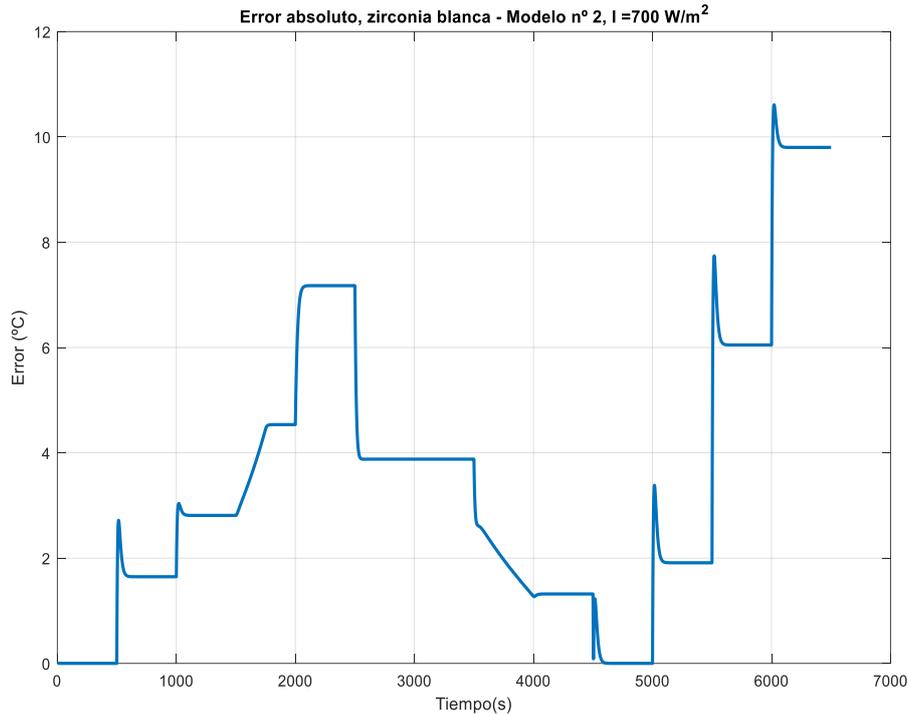


Figura 3.112. Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de zirconia blanca, radiación 700 W/m².

Por último, se muestran los índices de funcionamiento para la muestra de zirconia en el modelo n°2, que traen en general buenos resultados, siendo especialmente buenos los obtenidos en la segunda validación para una radiación de 700 W/m², ya que el error absoluto medio y la RMSE devuelven valores inferiores a los 5 °C lo que refleja que la precisión del modelo lineal para ese nivel de radiación es muy buena. Además, el valor de R² indica que el modelo lineal y no lineal poseen dinámicas casi idénticas para la segunda validación pues da 0.9991. Respecto a la segunda validación, al trabajar en un régimen de radiación de 600 W/m² el modelo no lineal no tiene tanta ganancia como el modelo lineal, puesto que en este rango de operación la influencia de la ganancia en la dinámica del modelo no lineal es muy grande.

Tabla 50. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°2 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 600 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 700 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	42.7651	10.6099
Error medio absoluto (°C)	21.8445	3.4511
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	25.5421	4.4153
R²	0.9608	0.9991

- Validación del tercer modelo lineal, rango del 15 % a 23 % de apertura de persiana.

$$G_3(s) = \frac{27.50}{8.50s + 1}$$

Seguidamente se muestra en la Figura 3.113 la entrada que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal número tres en el intervalo de apertura de persiana del 15 % al 23 %, partiendo de un punto de operación definido por una apertura de la persiana de un 19 %.

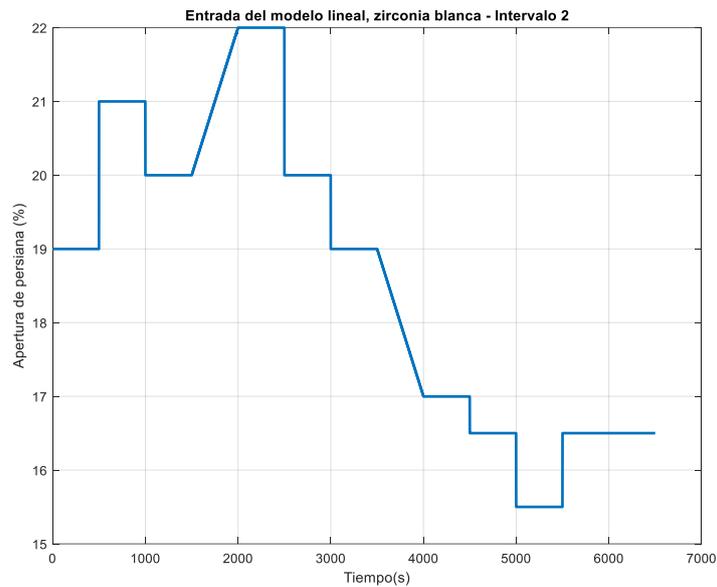


Figura 3.113. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°3, muestra de zirconia blanca.

Primeramente, se estudia la salida de ambos modelos para una radiación igual a 650 W/m², cuyos resultados se muestran en la Figura 3.114 y en la Figura 3.115, que demuestra que para el nivel de radiación estudiado el modelo lineal posee en general más ganancia que el modelo no lineal.

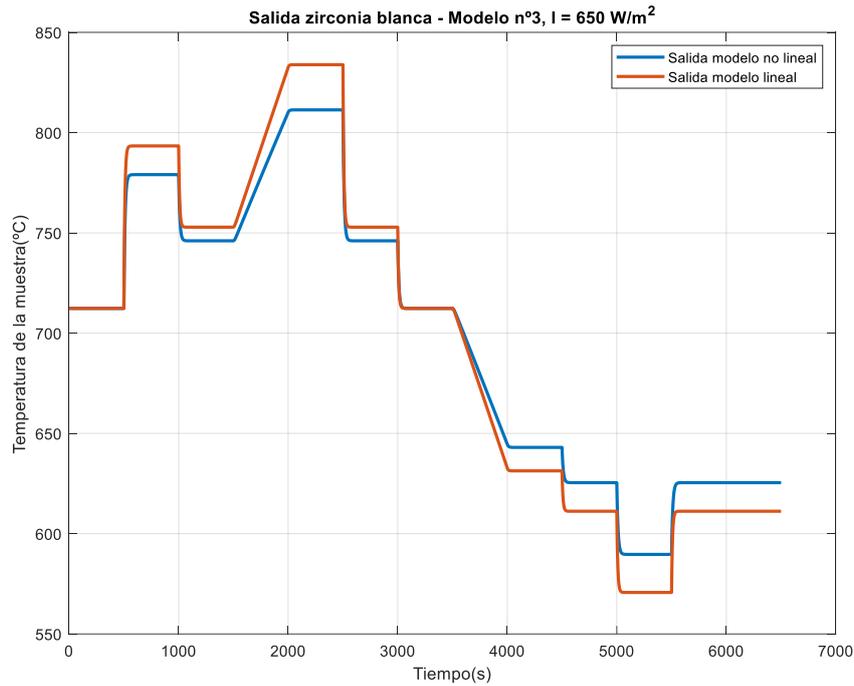


Figura 3.114. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m².

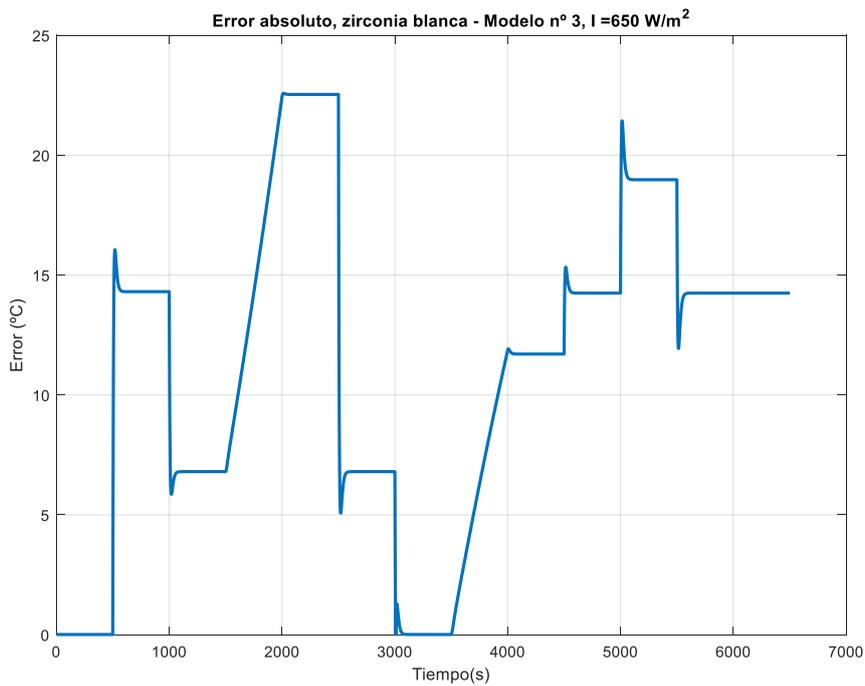


Figura 3.115. Error absoluto de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m².

A continuación se le introduce la misma entrada en la apertura de la persiana pero para una radiación constante e igual a 800 W/m², cuyos resultados se muestran en la Figura 3.116 y Figura 3.117, observando cómo al aumentar el nivel de radiación, el modelo no lineal adquiere más ganancia frente a la apertura de la persiana reduciendo así el error respecto del ensayo anterior a 650 W/m².

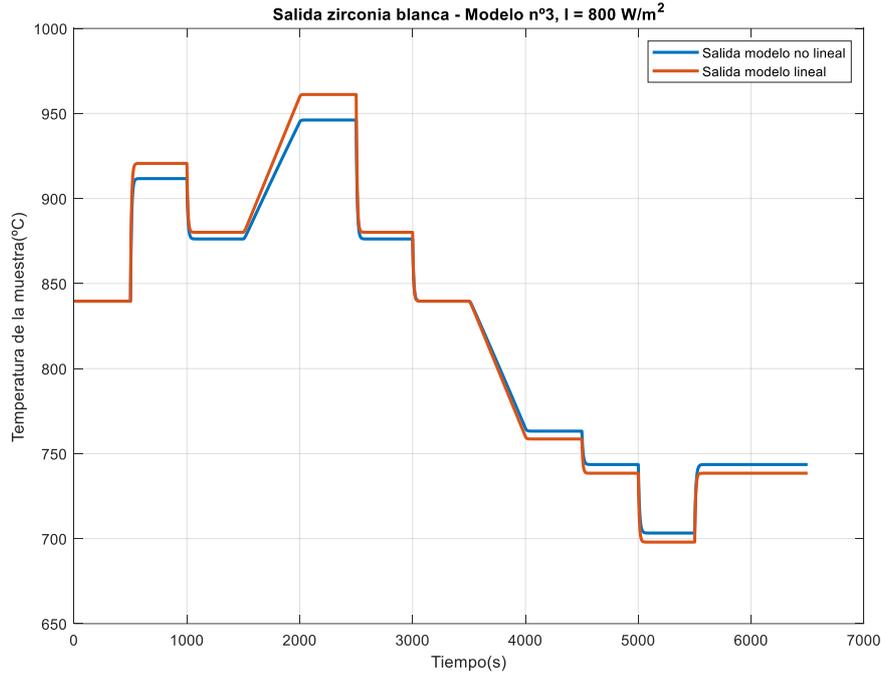


Figura 3.116. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m².

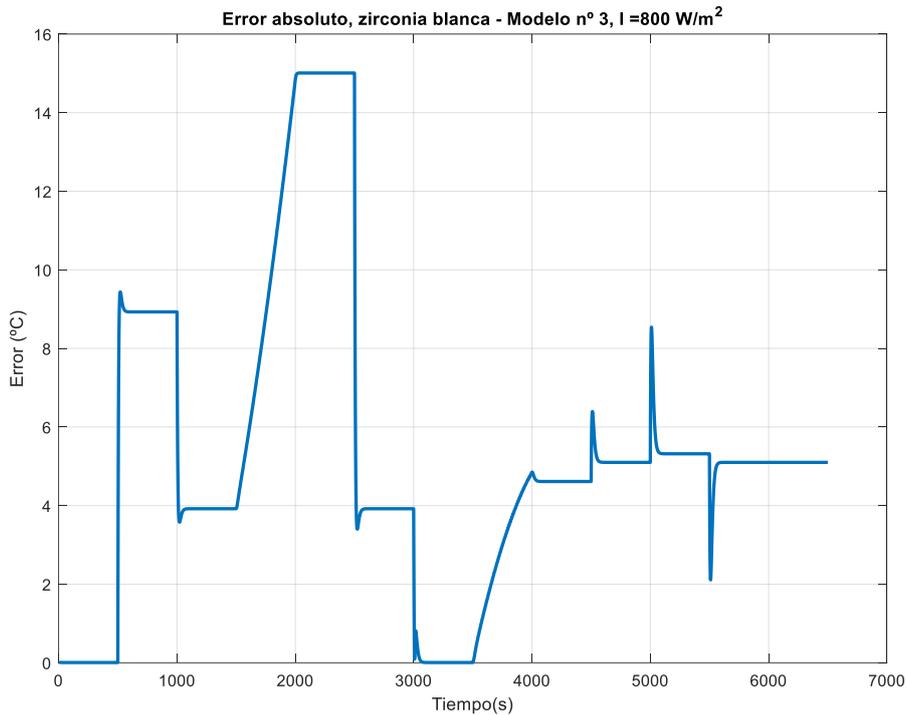


Figura 3.117. Error absoluto de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m².

La última validación del intervalo se realiza para una radiación constante de 950 W/m², cuyos resultados se muestran a continuación en la Figura 3.118 y Figura 3.119, cuyos resultados son muy buenos pues al aumentar el nivel de radiación el modelo no lineal posee más ganancia y su respuesta se acerca a la del modelo lineal estimado para este rango de operación.

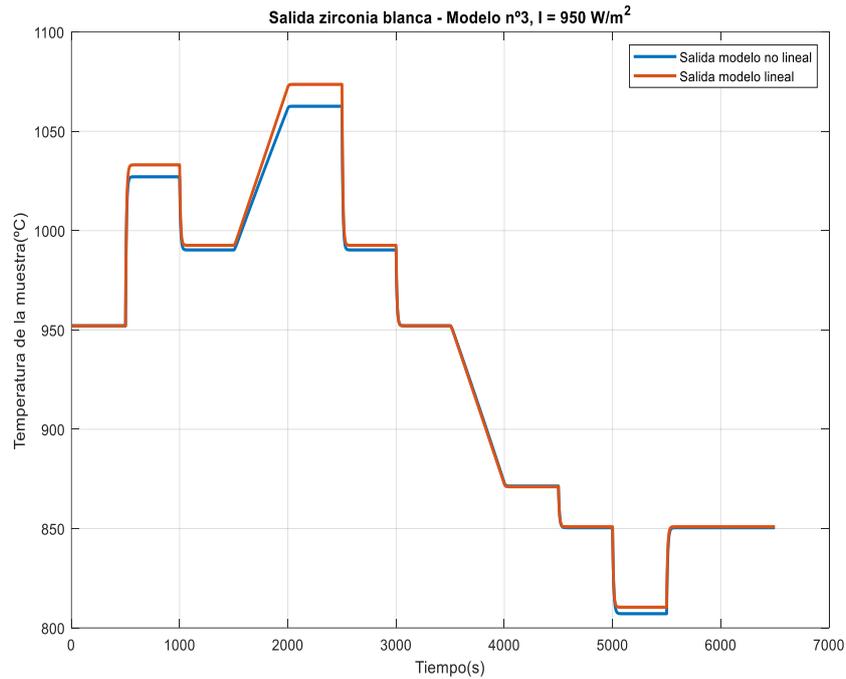


Figura 3.118. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m².

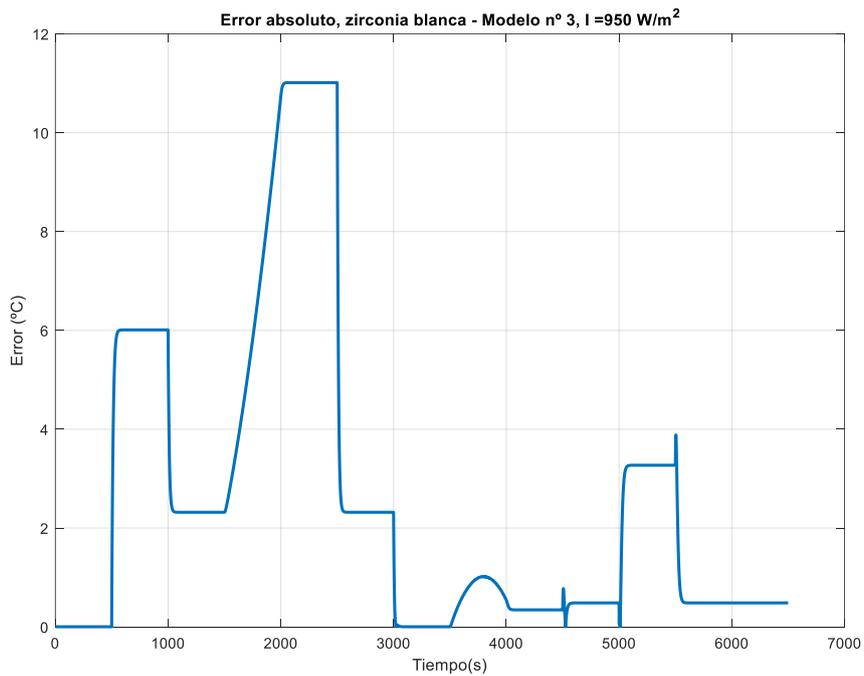


Figura 3.119. Error absoluto de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m².

Finalmente, se muestran a continuación los valores de los índices de funcionamiento para los distintos ensayos, que demuestran cómo el modelo lineal se comporta mejor respecto del modelo no lineal a radiaciones más cercanas al límite de apertura de persiana superior (23%). Tanto el primer como el segundo ensayo dan resultados muy buenos, con errores medios bajos dada la escala de temperaturas a la que se trabaja, llegando a 1000 °C en parte de la simulación, y los valores de R^2 son muy buenos ya que son muy cercanos a 1, sobre todo en el último caso con radiación igual a 950 W/m².

Tabla 51. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°3 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	22.5810	15.0094	11.0129
Error medio absoluto (°C)	11.1280	5.3116	2.8570
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	12.9942	6.6057	4.1452
R²	0.9649	0.9924	0.9973

- Validación del cuarto modelo lineal, rango del 23 % a 38 % de apertura de persiana.

$$G_4(s) = \frac{27.50}{8.50s + 1}$$

Para el modelo dado por el rango de apertura de persiana del 23% al 38%, se le aplica una entrada en la apertura de la persiana junto al modelo no lineal como la mostrada en la Figura 3.120 para distintos niveles de radiación, tal y como se ha ido realizando hasta ahora en los demás intervalos.

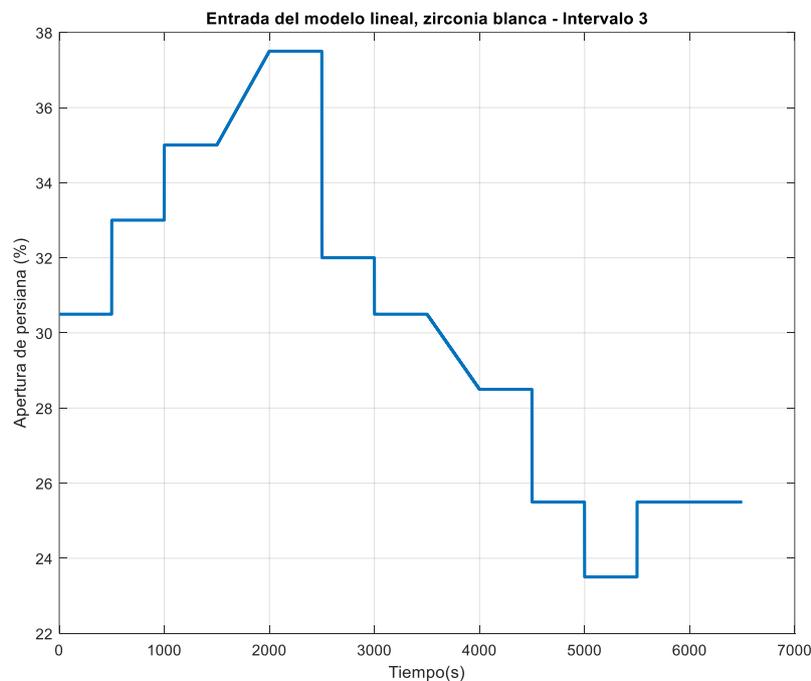


Figura 3.120. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°4, muestra de zirconia blanca.

El resultado que se muestra a continuación en la Figura 3.121 y en la Figura 3.122 es resultado de aplicar un nivel de radiación constante e igual a 650 W/m², junto con la

apertura de la persiana comentada anteriormente. Se observa como el modelo lineal posee más ganancia que el modelo no lineal, excepto en la parte central del intervalo donde estaría mejor calibrado. A bajas aperturas de persiana, es el modelo no lineal el que posee mayor ganancia como se puede observar entorno a los 5000 segundos de simulación.

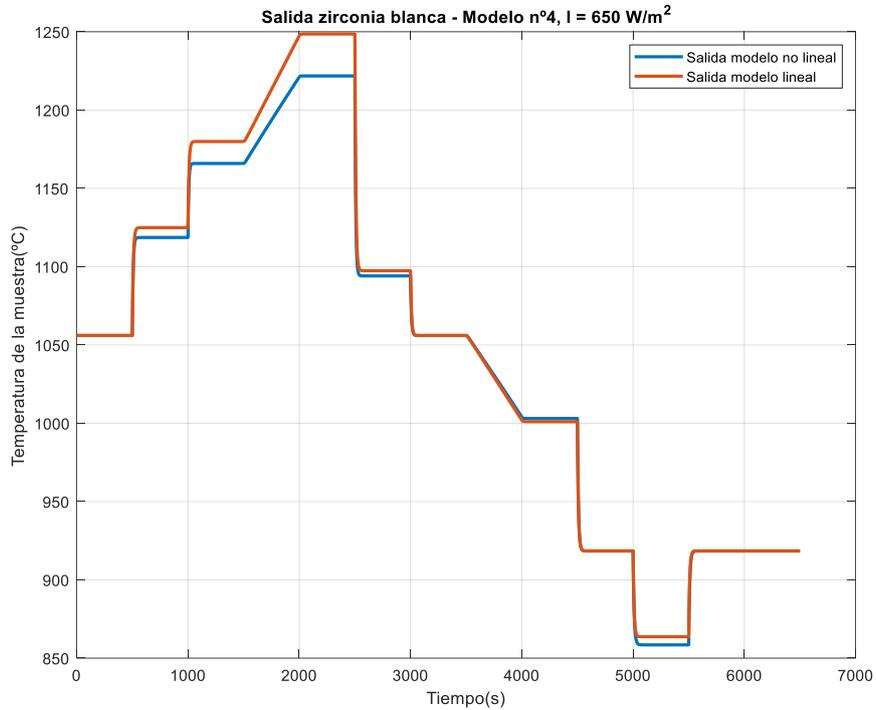


Figura 3.121. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m².

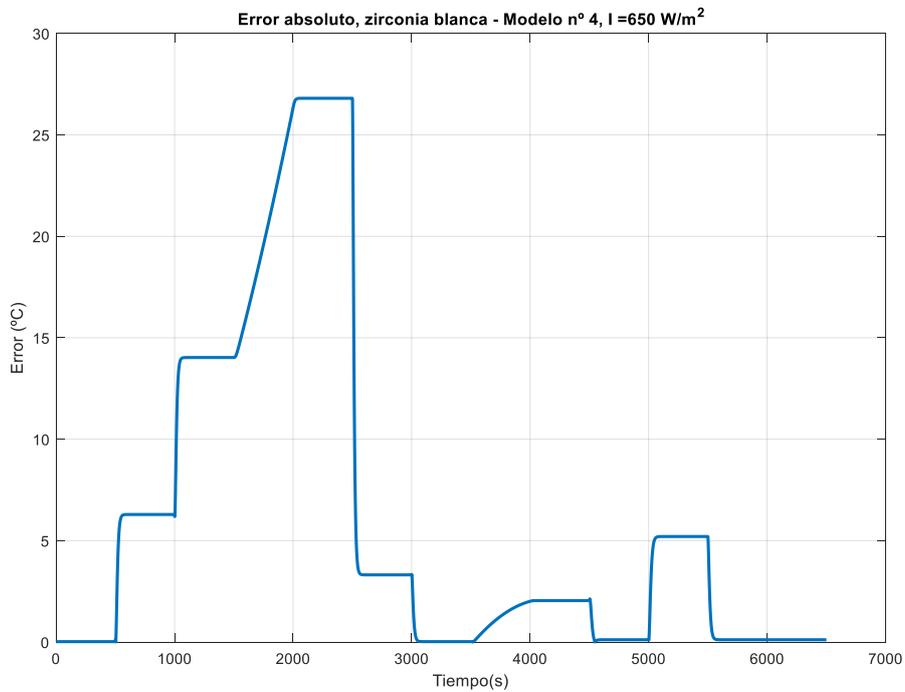


Figura 3.122. Error absoluto de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m².

La siguiente validación que se muestra en la Figura 3.123 y Figura 3.124 es con una radiación igual a 800 W/m^2 , donde se aprecia que el nivel de radiación al que se trabaja deja de influir tanto en la dinámica del modelo, puesto que el error apenas ha variado entre el modelo lineal (que es fijo para todas las validaciones) y el modelo no lineal, pese al aumento de radiación.

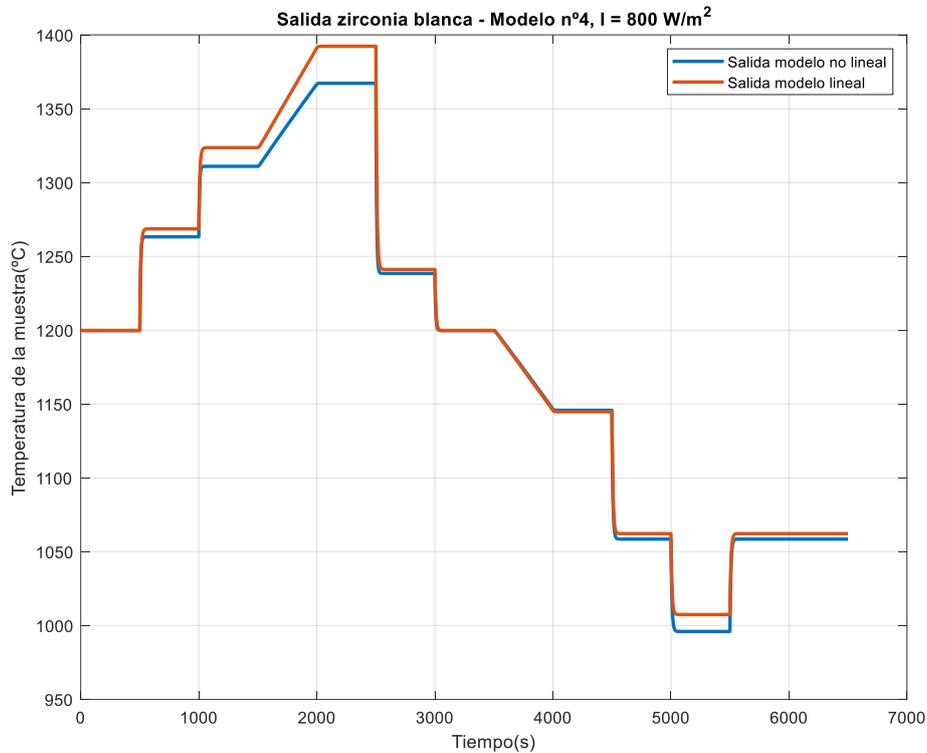


Figura 3.123. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m^2 .

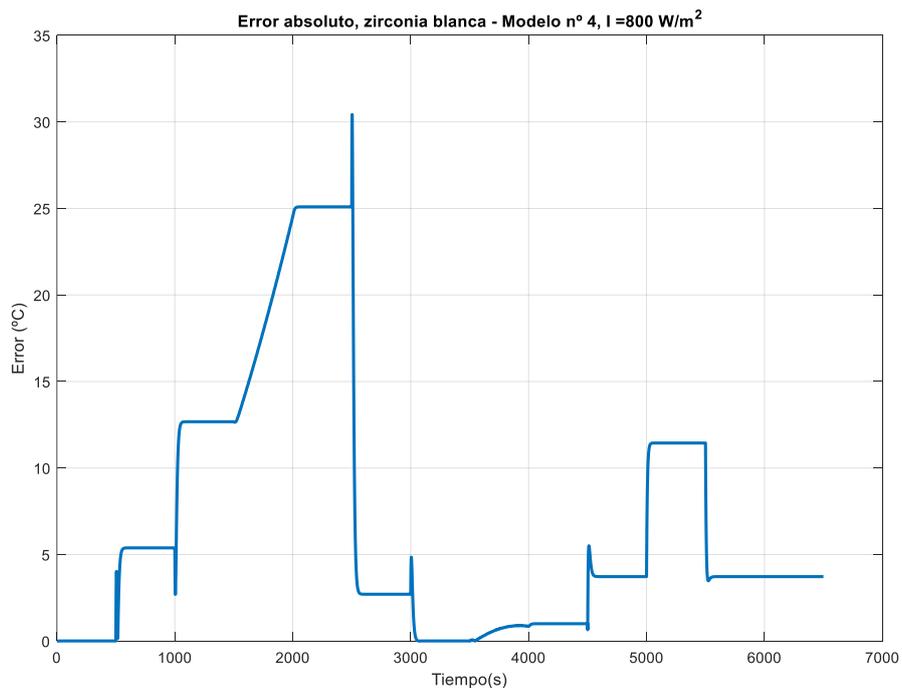


Figura 3.124. Error absoluto de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m^2 .

Por último, se valida el modelo lineal para un nivel de radiación de 950 W/m^2 para el modelo no lineal, cuyo resultado puede verse en la Figura 3.125 y Figura 3.126, donde siguen sin producirse cambios realmente significativos pese a aumentar el nivel de radiación solar.

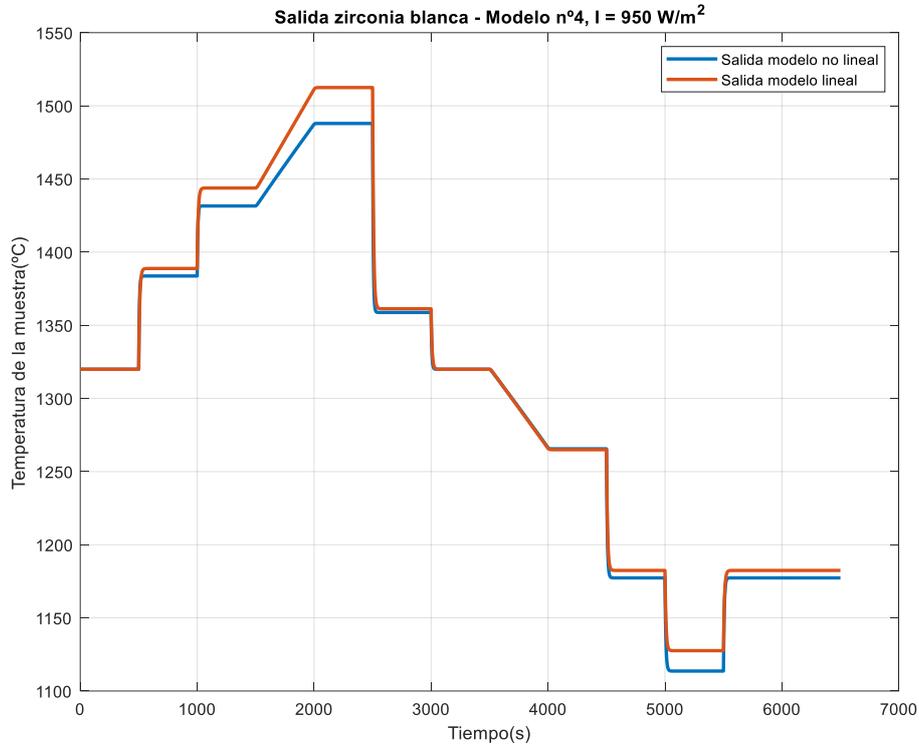


Figura 3.125. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m^2 .

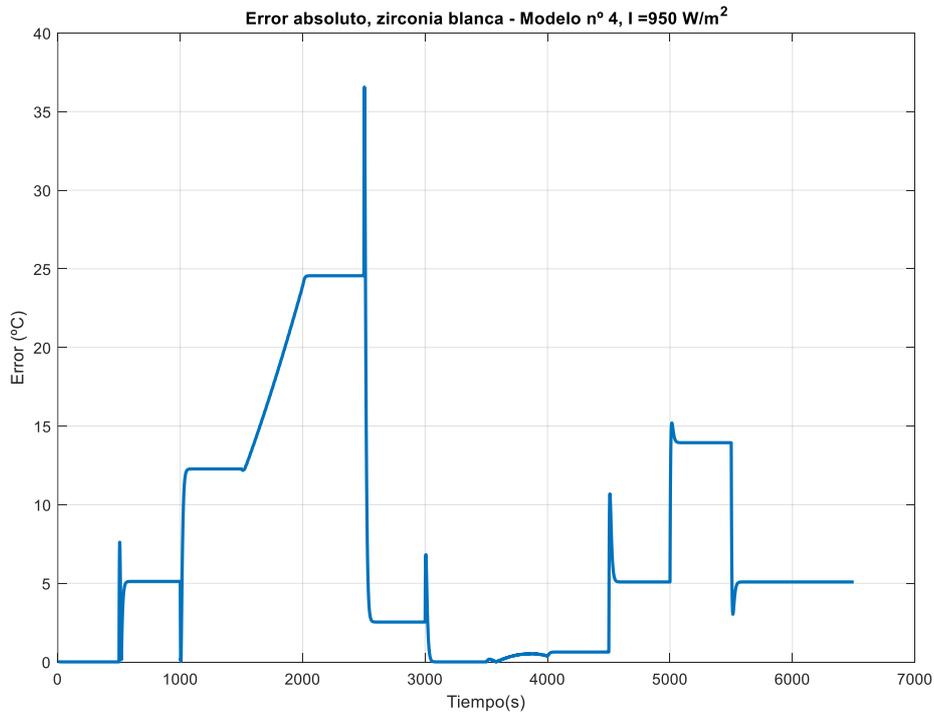


Figura 3.126. Error de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m^2 .

Por último, se muestra en la Tabla 52 los índices de funcionamiento calculados para cada ensayo de validación, lo cual muestra valores muy cercanos entre simulación y simulación, dando a entender la poca influencia que tiene ya en este rango de operación la radiación solar en comparación con el primer o segundo intervalo. Aun así, si se puede deducir de observar los valores obtenidos que el primer ensayo posee un error medio menor respecto de las otras simulaciones, aunque no hay mucha diferencia, lo mismo que ocurre con la RMSE que da valores muy parecidos entre las diferentes simulaciones. Por otra parte, los valores de R^2 son prácticamente idénticos entre sí y muy óptimos dada su cercanía a la unidad. Por último, se comenta que el error máximo absoluto en estos ensayos no proporciona información fiable dados los picos que se dan en el error absoluto cuando entra un escalón en la apertura de la persiana y que se deben a un pequeño desfase entre la señal del modelo no lineal y la señal del modelo lineal.

Tabla 52. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°4 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	26.8024	30.4275	36.5592
Error medio absoluto (°C)	6.0992	6.8278	7.1715
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	10.4027	10.2075	10.4066
R²	0.9913	0.9919	0.9917

- Validación del quinto modelo lineal, rango del 38 % a 60 % de apertura de persiana.

$$G_5(s) = \frac{17.75}{5.50s + 1}$$

Para validar este quinto modelo que comprende el rango de operación del 38 % al 60 % de la apertura de la persiana (y todo el rango de operación de la radiación), se le introduce una entrada como la que se muestra a continuación en la Figura 3.127.

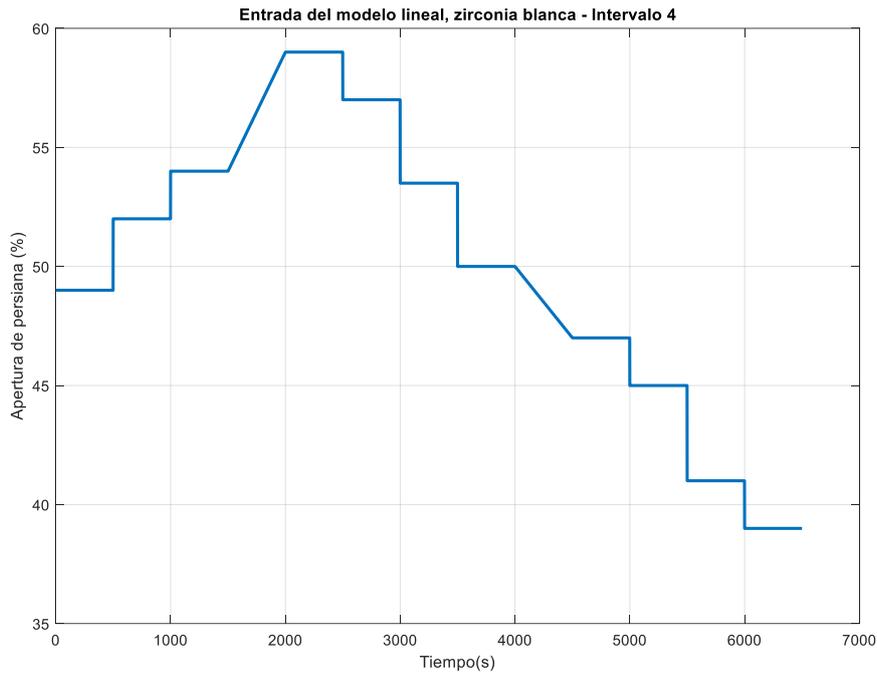


Figura 3.127. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°5, muestra de zirconia blanca.

A continuación se muestran en la Figura 3.128 y en la Figura 3.129 los resultados para un nivel de radiación de 650 W/m^2 , donde se aprecia que la salida del modelo no lineal es menor que la del lineal para aperturas de persiana grandes, pero es superior a la del modelo lineal para aperturas de persiana pequeñas dentro del intervalo estudiado, dando error casi nulo en la zona central del intervalo estudiado, lo cual se ve claramente en la gráfica del error absoluto.

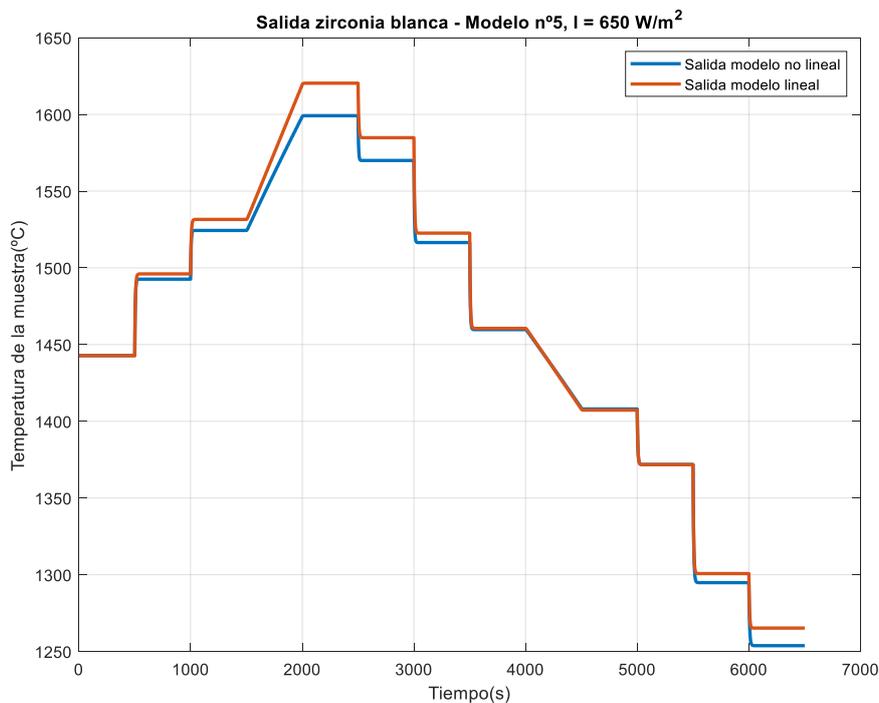


Figura 3.128. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m^2 .

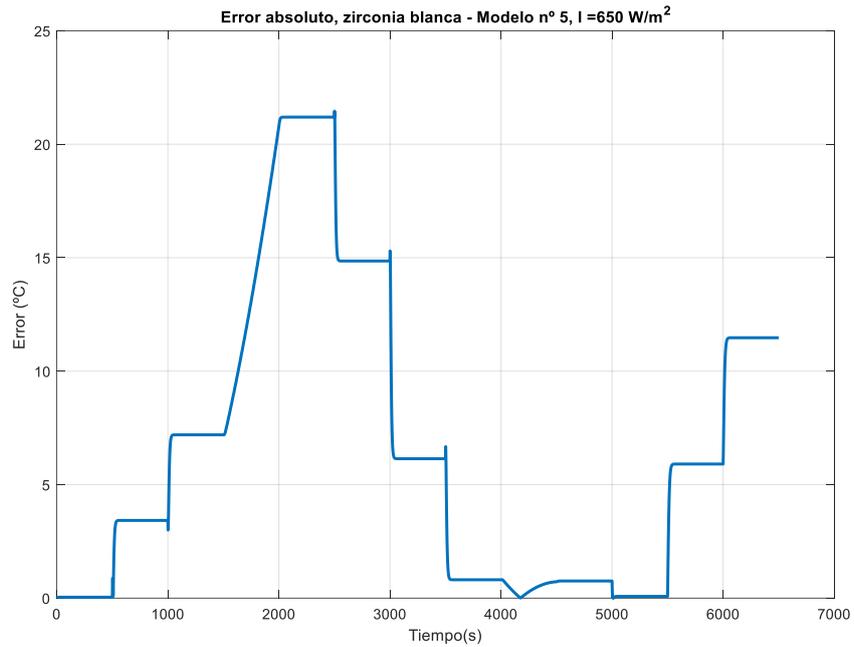


Figura 3.129. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m².

Seguidamente se valida el modelo lineal n° 5 para un nivel de 800 W/m², tal y como se muestra en la Figura 3.130 y Figura 3.131, donde se aprecia si se compara con el anterior ensayo que la radiación influye poco en el error que se da entre el modelo lineal y el no lineal.

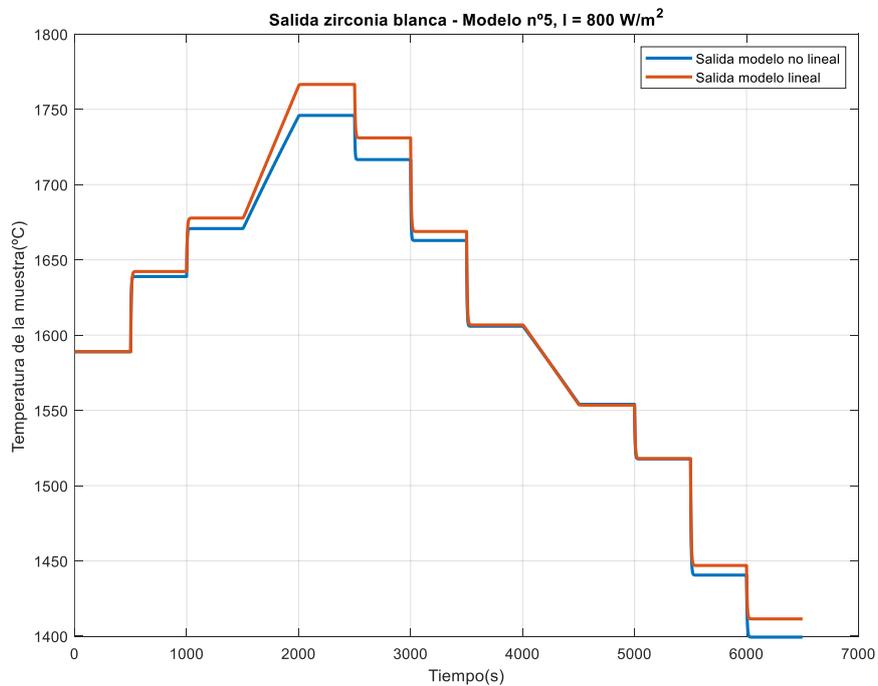


Figura 3.130. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m².

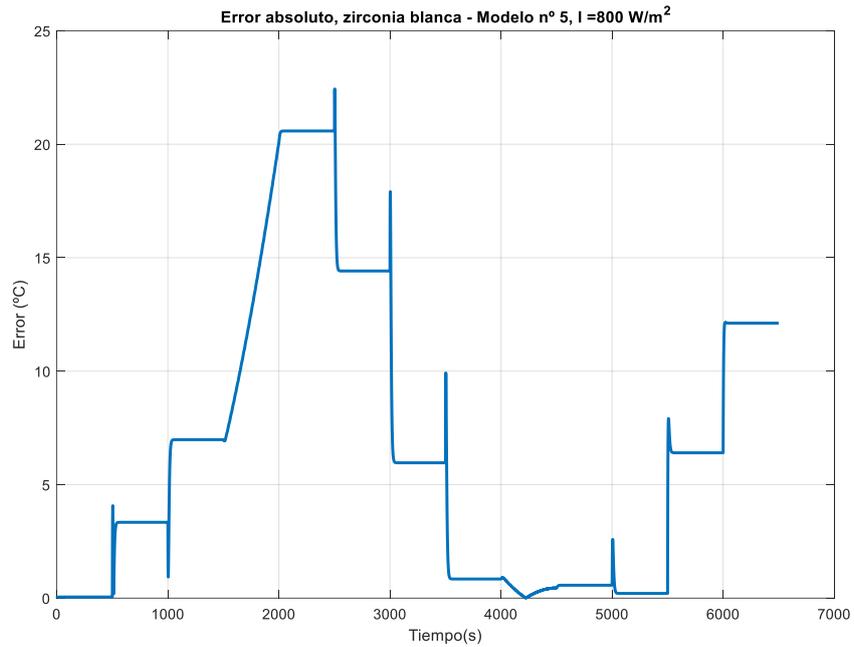


Figura 3.131. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m².

Por último, se valida el modelo lineal para un nivel de radiación igual a 950 W/m², tal y como se muestra en la Figura 3.132 y en la Figura 3.133, donde se puede apreciar una vez más la poca influencia que tiene la radiación en la no linealidad del modelo, implicando que al aumentar la radiación el error entre modelo lineal y no lineal apenas varíe.

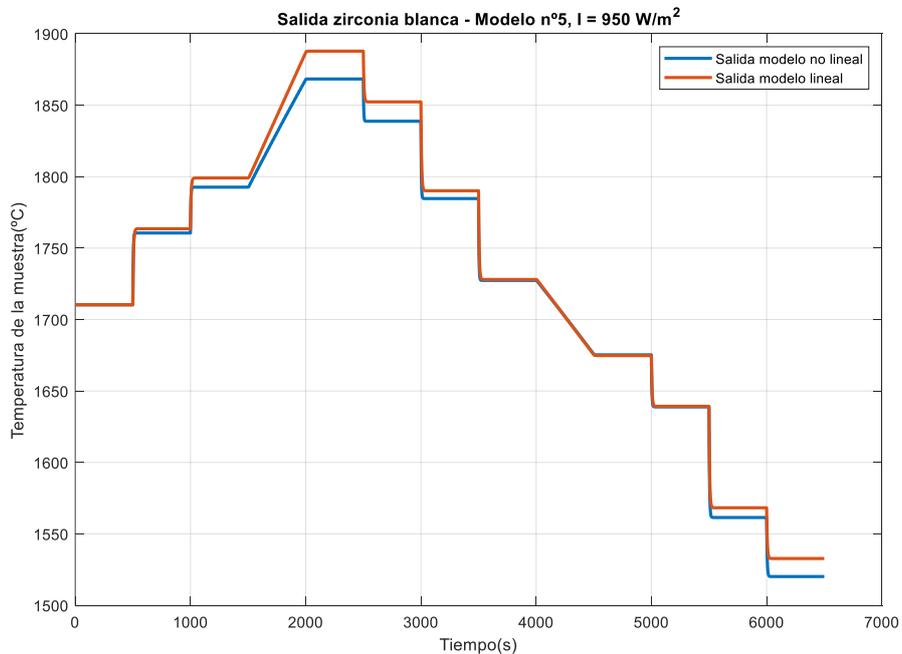


Figura 3.132. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m².

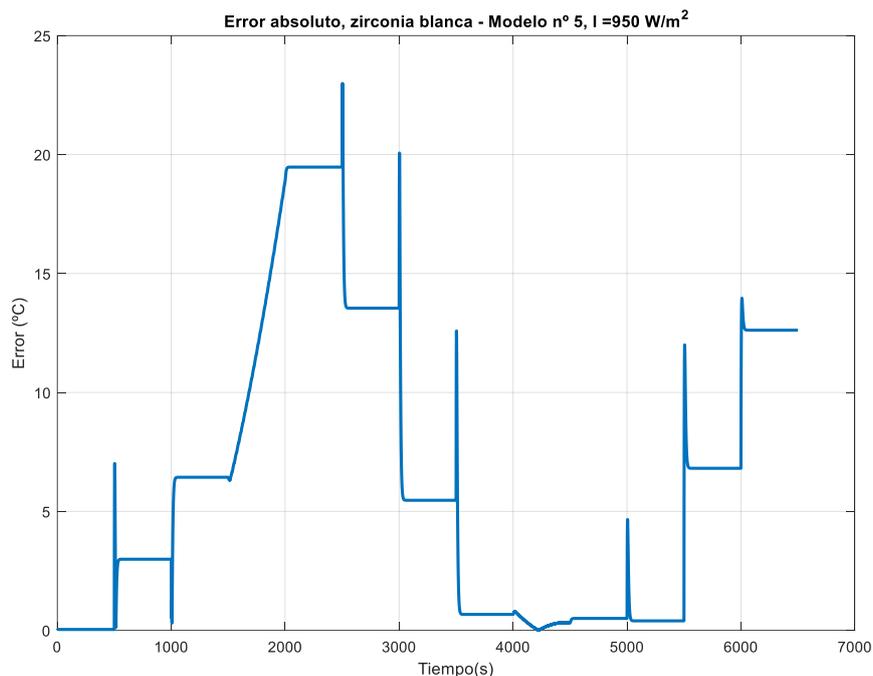


Figura 3.133. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m².

Por último, se muestran los índices de funcionamiento en la Tabla 53, los cuales arrojan valores muy buenos teniendo en cuenta el rango de operación en el que se trabaja, donde la temperatura de la muestra se va acercando a los 2000 °C. Por eso, un error medio de alrededor de 6 °C y una RMSE de 9 °C son índices muy aceptables teniendo en cuenta que el ensayo barre prácticamente todo el intervalo de la apertura de persiana y la radiación. El valor de R² es prácticamente 1, lo que corrobora lo dicho anteriormente, mientras que el error absoluto máximo se distorsiona debido a los picos que se dan al inicio de los cambios en la entrada, donde un sistema reacciona más bruscamente que otro (probablemente por la diferencia entre las constantes de tiempo) provocando que el error se dispare en ese instante.

Tabla 53. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°5 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	21.4609	22.4367	22.9933
Error medio absoluto (°C)	6.5931	6.5537	6.3175
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	9.3544	9.2304	8.8789
R²	0.9913	0.9916	0.9923

- Validación del sexto modelo lineal, rango del 23 % a 38 % de apertura de persiana.

$$G_6(s) = \frac{11.25}{2.50s + 1}$$

Se valida en último lugar el modelo n°6 de la muestra de zirconia, comprendiendo un rango de operación del 60 % al 100 % de la apertura de la persiana, y todo el rango de la radiación. La entrada introducida se muestra en la Figura 3.134, partiendo de un punto de operación de la apertura de persiana del 80 %.

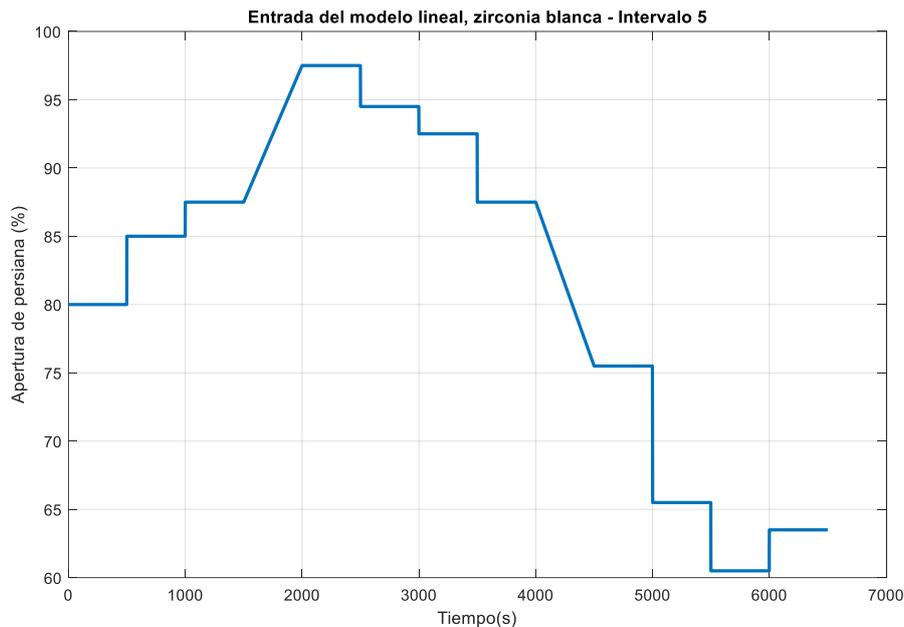


Figura 3.134. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°5, muestra de zirconia blanca.

Dada esta entrada, se le introduce al modelo lineal y al modelo no lineal y se obtiene los resultados mostrados en la Figura 3.135, con el error absoluto entre las salidas en la Figura 3.136. Se deduce, dados los resultados mostrados, que el modelo lineal posee mayor ganancia a altos valores de apertura de persiana, cercanos al límite de 100 %, mientras que posee menor ganancia que el modelo no lineal a bajos niveles de apertura de persiana del intervalo, cercano a 60 %. En cambio, en el centro del intervalo el modelo funciona muy bien (se puede observar la segunda rampa descendente, en torno a los 4000 segundos, como el error es muy cercano a 0, lo cual dado que se trabaja en torno a 2000 °C representa resultados positivos).

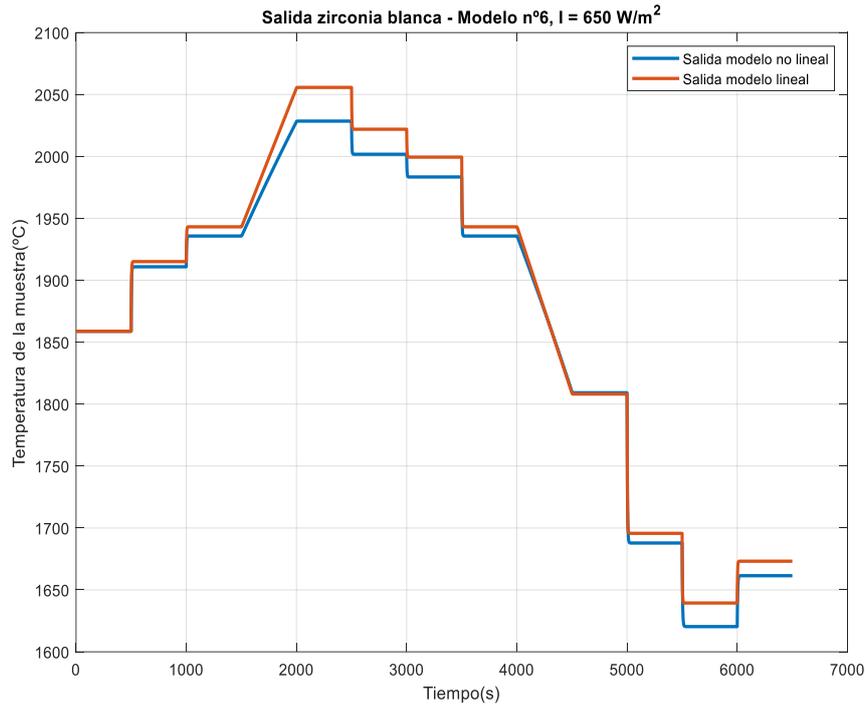


Figura 3.135. Validación, modelo lineal n°6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m².

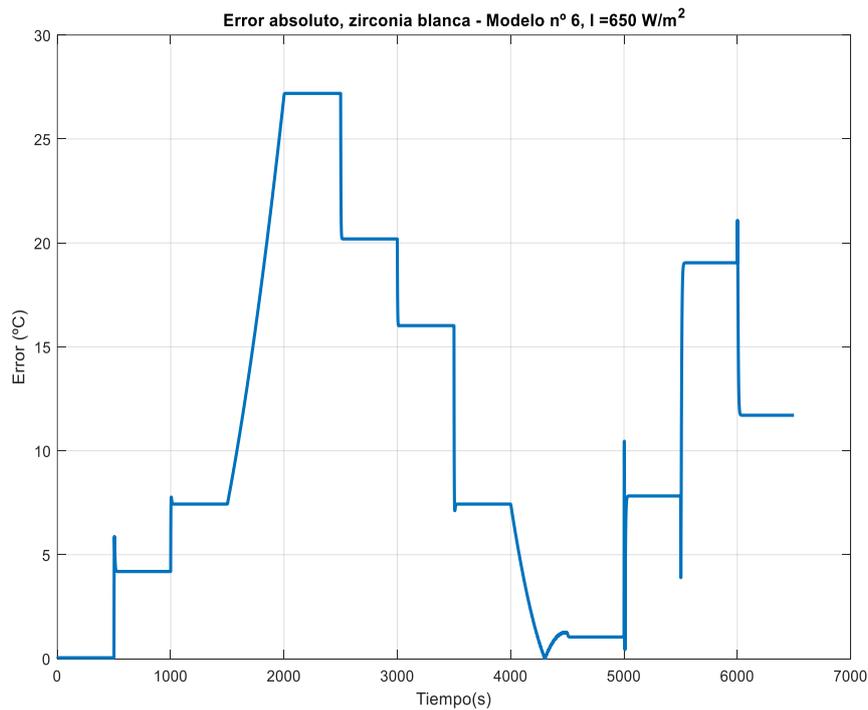


Figura 3.136. Error absoluto de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 650 W/m²

La siguiente validación se da para un nivel de radiación de 800 W/m², y el resultado se muestra a continuación en la Figura 3.137, mientras que en la Figura 3.138 se muestra el error absoluto entre ambas salidas de los modelos. Tal y como ocurría con la muestra de acero, el trabajar a un nivel de radiación u otro no influye en la dinámica del modelo de una forma significativa, dado que el error apenas varía entre la simulación a 650 W/m² y

la simulación a 800 W/m^2 . Aun así, se comparará una última vez estos resultados con un valor de radiación de 950 W/m^2 .

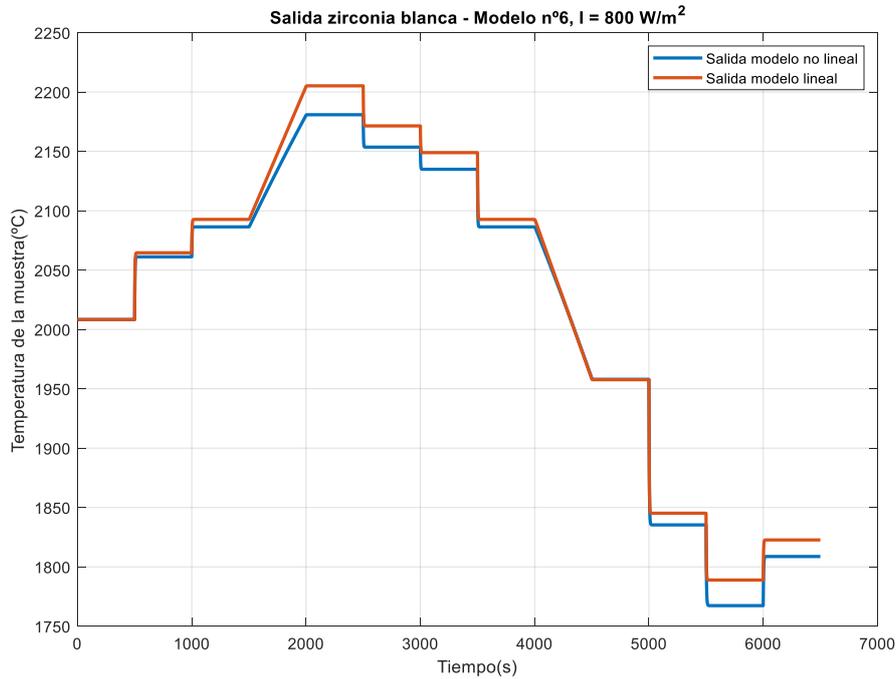


Figura 3.137. Validación, modelo lineal n°6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m^2

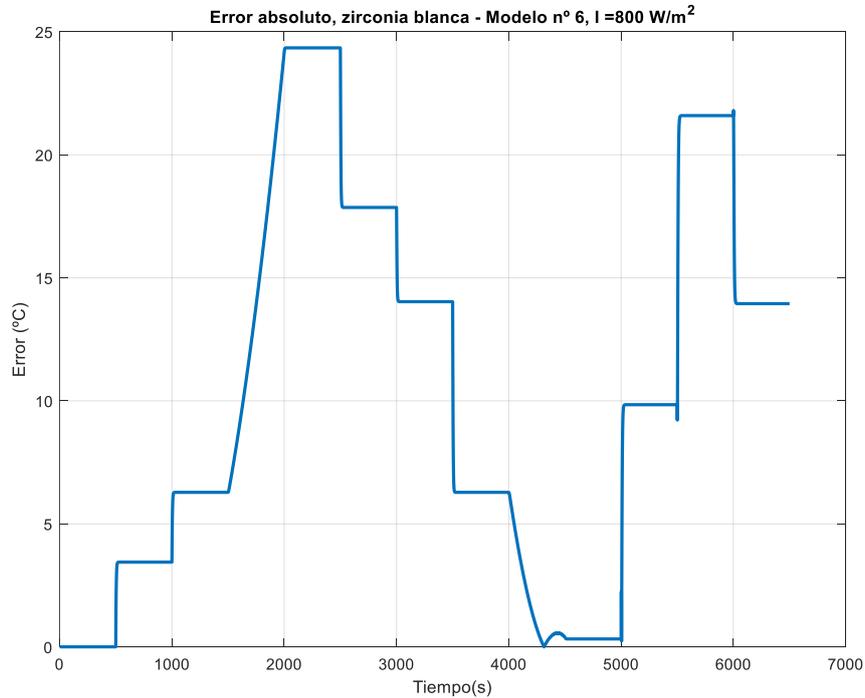


Figura 3.138. Error absoluto de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 800 W/m^2

Finalmente, se muestran los resultados de validación del modelo n° 6 para un valor de radiación de 900 W/m^2 en la Figura 3.139 y la Figura 3.140 donde la radiación implica

trabajar en un punto de operación de mayor temperatura pero no influye en la dinámica del modelo no lineal sustancialmente.

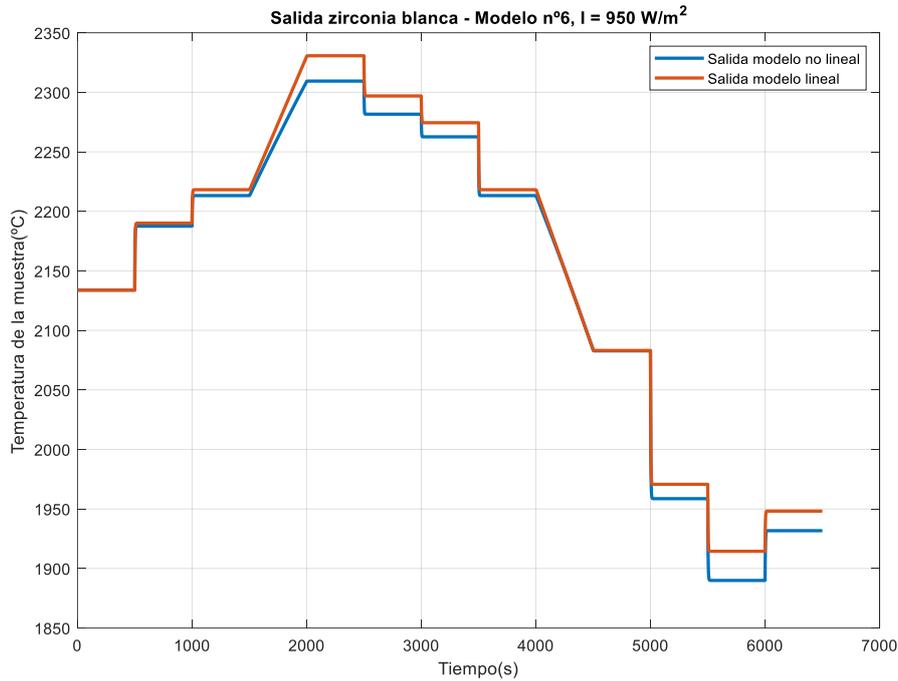


Figura 3.139. Validación, modelo lineal n°6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m²

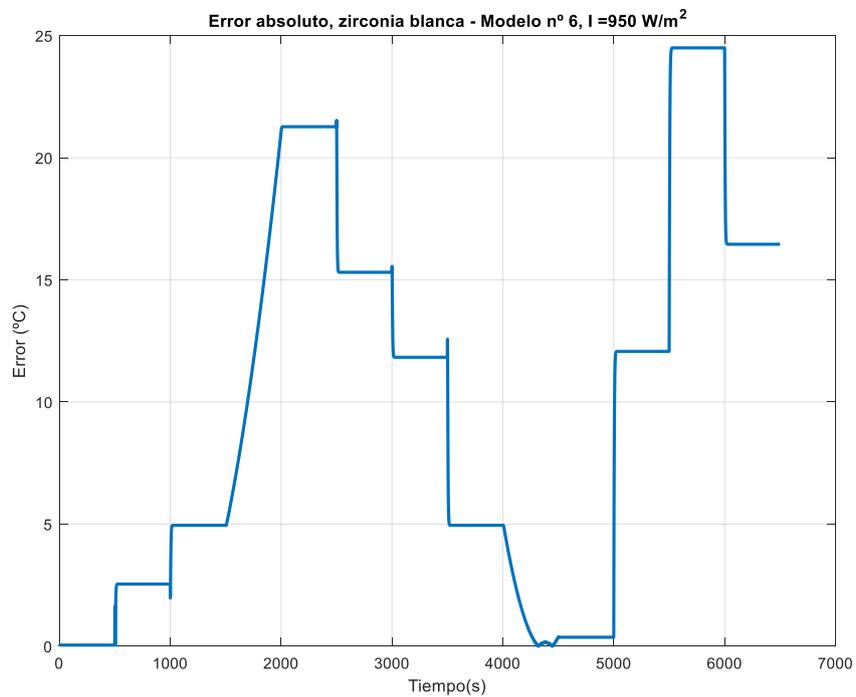


Figura 3.140. Error absoluto de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de zirconia blanca, radiación 950 W/m²

Por último, se muestra el resultado de los índices de funcionamiento para este último intervalo que demuestran, como se ha ido diciendo durante el análisis de las simulaciones realizadas, que la radiación influye poco para aperturas de persiana grandes en la dinámica del modelo. Por eso se obtienen valores de índices de funcionamiento muy

parecidos para las 3 simulaciones. Además, estos índices muestran que el modelo lineal funciona bien para este intervalo, ya que el RMSE y el error absoluto medio devuelven valores bajos dada la escala de temperaturas de la muestra a la que se trabaja, y el valor de R^2 es alto y cercano a 1. El error absoluto máximo en las simulaciones se da principalmente en la apertura de persiana más cercanas al valor inferior del intervalo, 60 %, pero también se obtienen valores altos de error en aperturas de persiana cercanas al 100 %, lo cual es lógico tratándose de un modelo medio del intervalo. Aun así, este error no es de gran envergadura dada la escala de temperatura de la muestra a la que se trabaja.

Tabla 54. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°6 respecto del modelo no lineal, para la muestra de zirconia blanca en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	27.1920	24.3478	24.4972
Error medio absoluto (°C)	10.8211	10.3059	9.8199
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	13.5959	12.9950	12.6216
R²	0.9892	0.9904	0.9912

3.2.3 Sinterizado de cobre

A continuación se muestra en la Tabla 55 los parámetros característicos de la muestra de cobre que se utilizan para el cálculo del modelo lineal y su validación.

Tabla 55. Resumen de los parámetros característicos de la muestra de cobre que conforman el modelo.

Parámetros característicos de la muestra de cobre	Valor	Unidades
m_s	0.4143	(Kg)
$c_s(a\ 25\ ^\circ C)$	352	J/(Kg·K)
S_s	$6.4 \cdot 10^{-3}$	m ²
α_a	0.03652	-
α_c	24.4767	W/(m ² ·K ⁴)
α_e	1.0278	-

Como se hizo con el acero A316-L y con la zirconia blanca, a la hora de obtener la dependencia de la radiación solar y la apertura de la persiana con la temperatura de la muestra, y en consecuencia, con la ganancia y constante de tiempo del modelo lineal, se

ha trabajado con un calor específico de 396, correspondiente al calor específico a 200 °C, según se explicó en esta parte de la memoria de los resultados, durante la calibración del modelo no lineal utilizando un algoritmo genético con los datos de la muestra de cobre en la Tabla 19, ya que por lo general no se trabajará a 25 °C.

A continuación, se repetirá el mismo procedimiento seguido con el acero A316-L y la muestra de zirconia blanca anteriormente para obtener los modelos lineales, por lo que se hará una explicación menos exhaustiva que entonces. Se enumeran los pasos seguidos a continuación para la obtención y validación de los modelos lineales que abarcan todo el rango de operación de la pieza:

- Primeramente, se mostrará la dependencia de la ganancia y la constante de tiempo del modelo lineal con la apertura de la persiana y la radiación,
- Luego se establecerán los intervalos en torno a una variación de la ganancia y la constante de tiempo de un 25 %, y en base a dicha división del rango de operación, se establecerán tantos modelos como sea necesario para abarcar todo el rango de operación comentado.
- Una vez establecidos los intervalos del rango de operación e n función de sus entradas de radiación y apertura de la persiana, se definirán los valores de ganancia y constante de tiempo medias para cada intervalo que conformarán los modelos lineales pertinentes.
- Se mostrarán los resultados de validación de los modelos lineales junto a los índices de funcionamiento de cada simulación.

Por tanto, se comienza obteniendo la distribución de la ganancia y constante de tiempo en todo el rango de operación en función de la radiación solar y la apertura de la persiana, en base a condición de estado estacionario que se desarrolló en el Capítulo 2 de la memoria (ver (2.19)). Estos resultados se muestran en la Figura 3.141 para la ganancia del modelo lineal, y en la Figura 3.142 para la constante de tiempo del modelo lineal. Es notorio los grandes valores que alcanza la constante de tiempo, llegando a los 900 segundos en ciertas partes de su rango de operación.

Se aprecia en ambas la no linealidad presente en el modelo, al igual que ocurría con las otras muestras de ensayo, y se muestra en la ganancia una fuerte dependencia de la radiación con esta variable para valores pequeños de apertura de persiana. Por tanto, dado que la dependencia de la apertura de la persiana es más dominante que la radiación, se decide realizar la división conforme a esta variable, aunque se respetarán en los cortes las zonas influenciadas por la radiación para obtener un buen resultado de modelado.

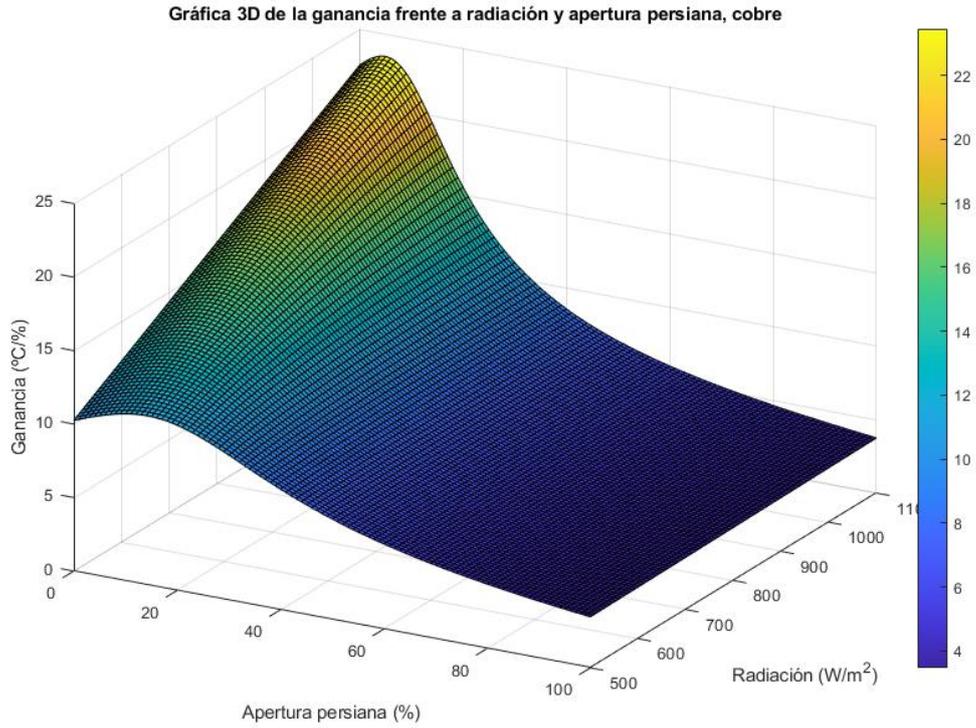


Figura 3.141. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia (k) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de cobre.

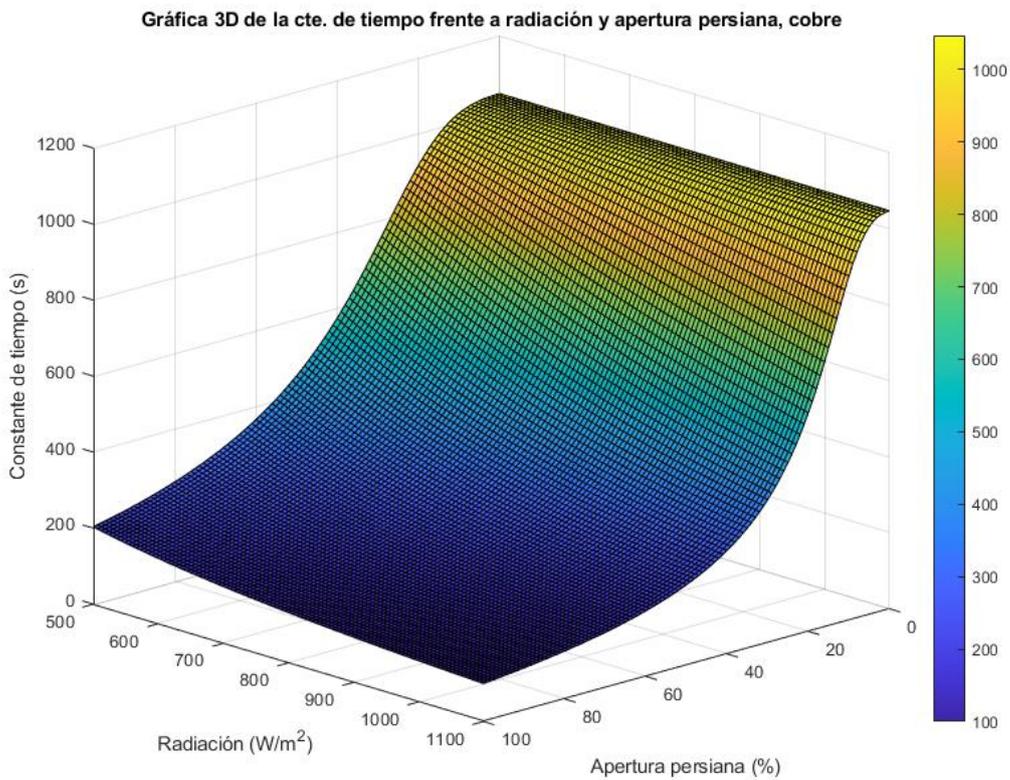


Figura 3.142. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo (τ) del modelo de la muestra, en estado estacionario, respecto de la radiación y de la apertura de la persiana. Muestra de cobre.

Dado el anterior análisis, se procede a cortar la superficie tanto de la ganancia como de la constante de tiempo mediante planos perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos del rango de operación para calcular los modelos lineales medios en cada uno. Para la ganancia, puesto que aproximadamente tiene un valor máximo de 23.50 y un mínimo de 3.50, se divide en 4 cortes la superficie de la misma, dando como resultado la Figura 3.143, donde se aprecia como la parte superior de la superficie no recoge a la radiación en su rango completo (como ocurría de la misma manera para el acero A316-L y la muestra de zirconia blanca).

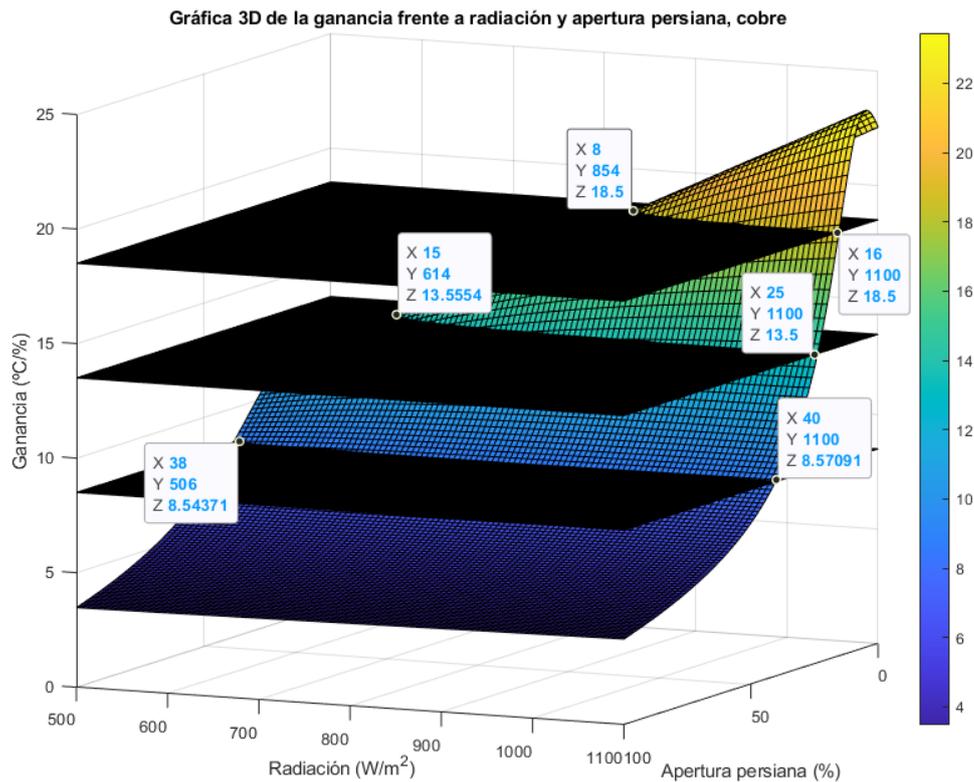


Figura 3.143. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de cobre

Dada la distribución obtenida tras aplicar los cortes, se resumen en la Tabla 56 los intervalos escogidos, que se han seleccionado cuidadosamente y de forma aproximado dado que la línea de corte entre la superficie de la ganancia y el plano de corte no se trata de una línea recta sino de una línea curva en la dirección de la apertura de la persiana. Además, es importante resaltar que el intervalo 1 solamente es válido cuando se trabaja entre radiaciones entre 850 y 1100 W/m^2 . Las demás contribuciones de la radiación solar a la hora de establecer los intervalos se han despreciado, como por ejemplo el intervalo 2 que solamente valdría de 600 a 1100, que se ha considerado como válido para todo el rango de radiación.

Tabla 56. Intervalos del rango de operación para la apertura de la persiana establecidos para la muestra de cobre, y ganancia media de cada intervalo.

N° de intervalo	Límites de intervalos de ganancia (°C/%)		Límites de intervalos de apertura de persiana (%)		$k_{U,media}$ (°C/%)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	23.50	18.50	0	13	21
2	18.50	13.50	13	20	16
3	13.50	8.50	20	40	11
4	8.50	3.50	40	100	6

Posteriormente, dado que la constante de tiempo varía de 1050 segundos a 100 segundos, se obtiene también mediante 4 cortes con planos perpendiculares al eje Z los intervalos siguientes mostrados en la Figura 3.144, donde se aprecia que los cortes de los planos perpendiculares al eje Z con la superficie de la constante de tiempo son curvos respecto de la apertura de la persiana, lo que dificulta la selección de los intervalos. Sin embargo, a modo de simplificar, se intentará coger el valor medio de esas líneas curvas y que se ajusten a los cortes que se han realizado anteriormente a la superficie en tres dimensiones de la ganancia.

Nótese que de analizar la constante de tiempo para el rango de operación de la muestra de cobre se obtiene que ésta comprende un rango enorme, es decir, es muy variable respecto del punto de operación. Pese a haber aplicado este método de dividir en intervalos el rango de operación para tener modelos que funcionen bien en cada intervalo, este método se ve influenciado por la forma de las líneas de corte de la superficie con los planos, que en este caso son muy curvas. Por tanto, el modelado en cuanto a la constante de tiempo de esta muestra de cobre puede que no sea muy preciso, pero a modo de simplificar, se ha decidido dejarlo así. Si se hubiera deseado una mayor precisión, se debería haber aumentado el número de cortes y obtener así mas intervalos del rango de operación, disminuyendo así la incertidumbre de los modelos lineales.

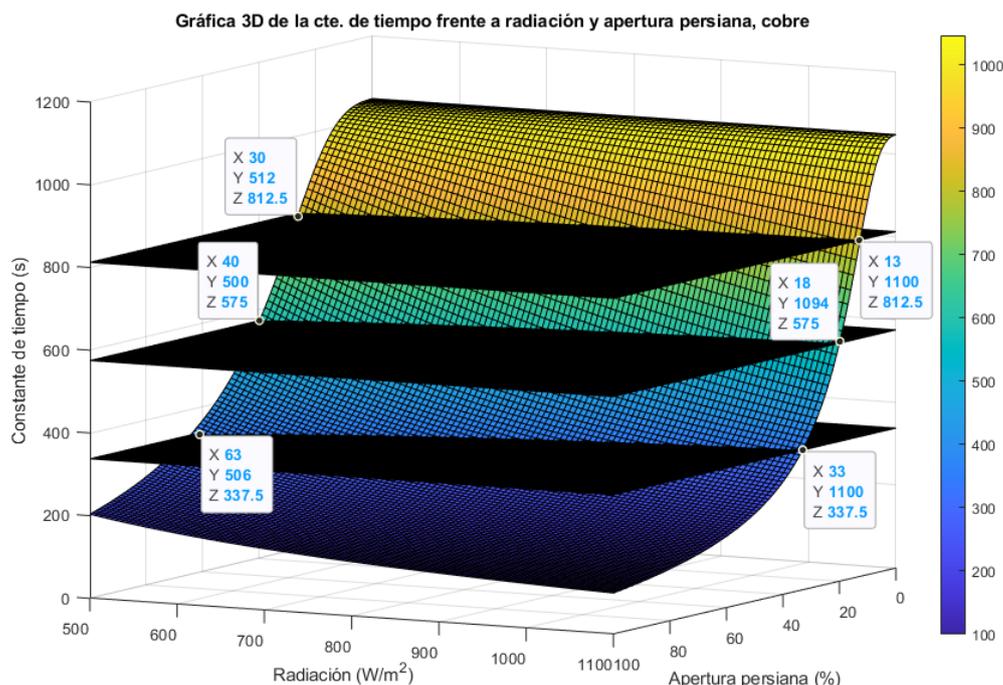


Figura 3.144. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m²), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de cobre.

A continuación, se muestran los intervalos diseñados para la muestra de cobre en función de la constante de tiempo en la Tabla 57.

Tabla 57. Intervalos del rango de operación establecidos para la muestra de cobre, y constante de tiempo media para cada uno.

Nº de intervalo	Límites de intervalos de constante de tiempo (s)		Límites de intervalos de apertura de persiana (%)		τ_{media} (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	1050	812.50	0	20	931.25
2	812.50	575	20	40	693.75
3	575	337.50	40	60	456.25
4	337.50	100	60	100	218.75

Finalmente, dados estos intervalos para la ganancia por un lado y para la constante de tiempo por otro, se cruzan estos datos y se obtienen los modelos lineales, que se resumen en la Tabla 58, donde se ha tenido en cuenta la influencia de la radiación solar en el primer intervalo obtenido para la ganancia (ver Figura 3.143 donde se aplicaron los cortes) puesto que realmente ese modelo es válido solo para dicho rango de radiación, donde se ha puesto el límite en 800 W/m² en vez de 850 W/m² para simplificar los cálculos. Nótese que el modelo nº2 se repite dos veces (por eso la nomenclatura de 2A o 2B) ya que se obtiene el mismo modelo de cruzar los datos de la constante de tiempo y de la ganancia, y donde el primer modelo de la ganancia solo funciona para un rango determinado de

radiación y por lo tanto el mismo rango de apertura de persiana funciona con el modelo 2 pero para distintos niveles de radiación.

Tabla 58. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de cobre.

N° de modelo	Apertura de persiana (%)		Radiación (W/m ²)		Ganancia, k_U (°C/%)	Constante de tiempo, τ (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
1	0	13	1100	800	21	931.25
2A	0	13	800	500	16	931.25
2B	13	20	Todo el rango		16	931.25
3	20	40	Todo el rango		11	693.75
4	40	60	Todo el rango		6	456.25
5	60	100	Todo el rango		6	218.75

Una vez establecidos los modelos lineales, se comienza a validarlos uno a uno, mediante ensayos a distintos niveles de radiación que abarquen todo el rango de apertura de la persiana del intervalo.

A diferencia de como se hizo con los modelos del acero A316-L, en esta parte no se mostrará tabulada la entrada introducida, sino que directamente se mostrarán las gráficas de la apertura de la persiana respecto del tiempo de simulación para cada intervalo.

- Validación del modelo lineal n°1, de 0 % al 13 % de apertura de persiana.

$$G_1(s) = \frac{21}{931.25s + 1}$$

Dadas las escalas de la constante de tiempo para los ensayos con la muestra de cobre, se decide trabajar en horas en vez de en segundos de simulación, durante todos los ensayos para esta muestra, ya que si no el modelo no tiene tiempo de alcanzar un valor en estado estacionario.

Por otra parte, es conveniente recordar que esta validación del modelo n°1 es solamente válida para radiaciones de 800 W/m² hasta 1100 W/m². Por tanto, se realizarán dos validaciones con dos niveles de radiación intermedios, 900 W/m² y 1000 W/m². A continuación, se muestra en la Figura 3.145, la entrada a los modelos que se utiliza en los ensayos para este primer intervalo de la apertura de persiana, partiendo de un punto de operación de 6.50 %.

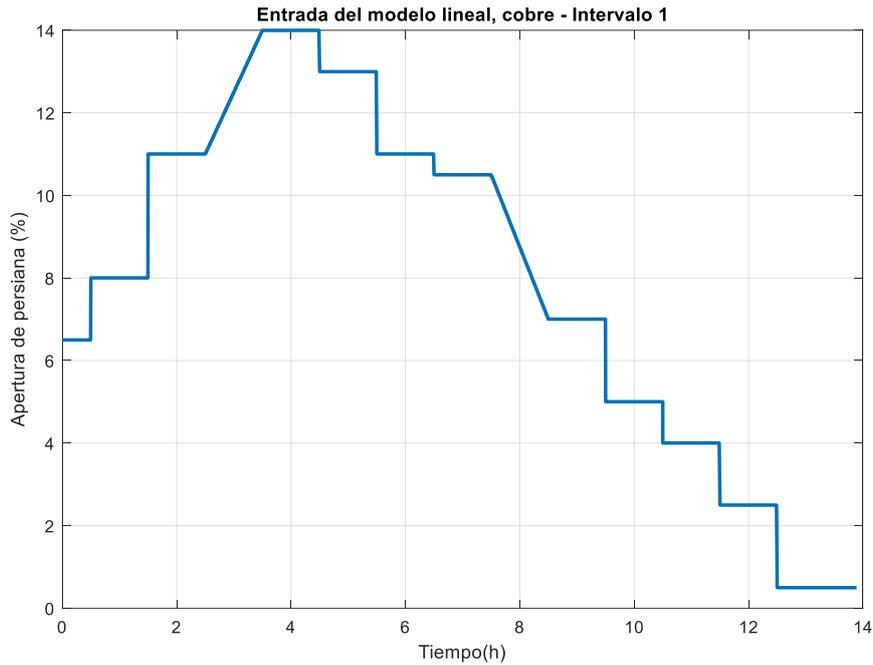


Figura 3.145. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°1 y 2A, muestra de cobre.

Una vez definida la entrada en la apertura de la persiana, se procede a validar el primer modelo lineal en el primer intervalo, para un nivel de radiación de 900 W/m^2 . El resultado se puede observar en la Figura 3.146, donde se aprecia un buen ajuste del modelo lineal a la salida del modelo no lineal, sobre todo en la parte central del intervalo. Se puede observar como el modelo lineal posee más ganancia en general que el modelo no lineal, tanto a aperturas de persiana grandes como a pequeñas, dentro del intervalo estudiado. El error en valor absoluto entre las salidas se muestra en Figura 3.147, que se aprecia que no toma valores muy grandes.

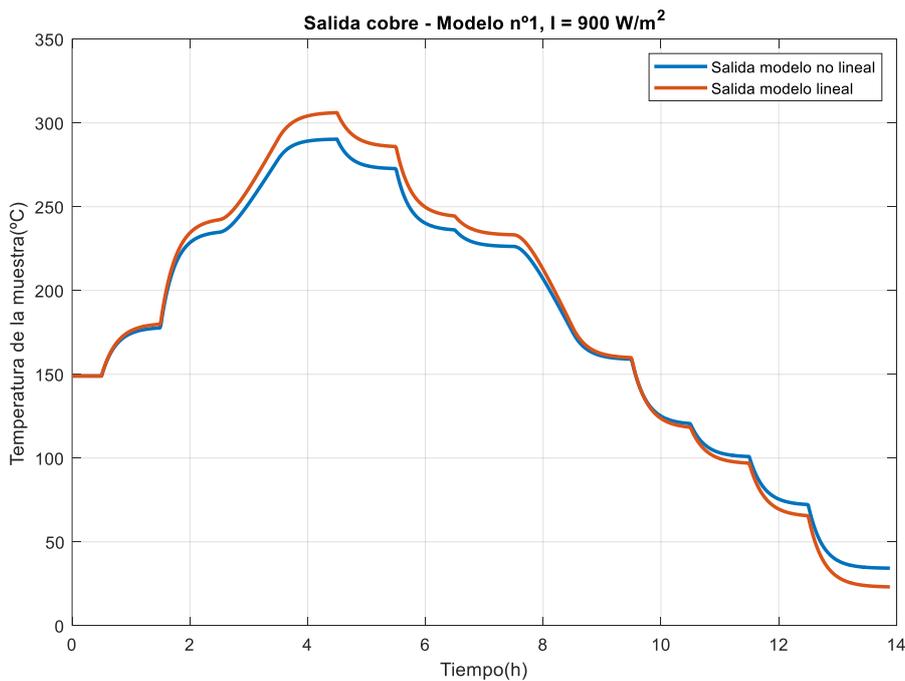


Figura 3.146. Validación, modelo lineal n°1 de la muestra de cobre, radiación 900 W/m^2

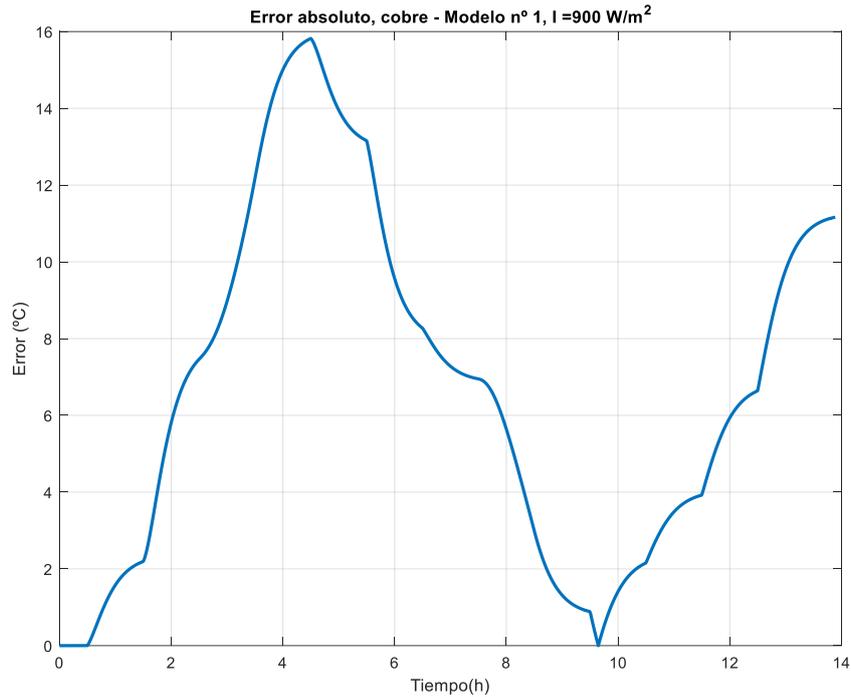


Figura 3.147. Error absoluto de validación, modelo lineal n°1 de la muestra de cobre, radiación 900 W/m²

Se procede ahora a validar el modelo para un nivel de radiación solar de 1000 W/m², cuyo resultado se muestra a continuación en la Figura 3.148, mientras que en la Figura 3.149 se muestra el error absoluto entre las dos salidas. Es notorio observar que el modelo lineal funciona muy bien para este nivel de radiación. Si se compara con el ensayo anterior a menor radiación, es llamativo cómo el aumento de radiación implica que el modelo no lineal tenga más ganancia (pueda alcanzar más grados para el mismo porcentaje de apertura) haciendo así que se equipare con la del modelo lineal.

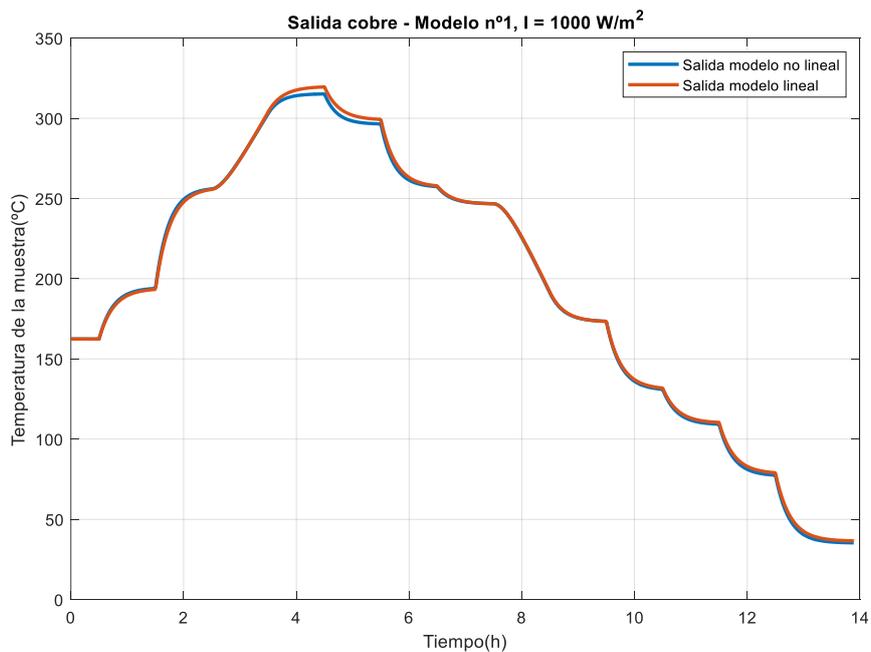


Figura 3.148. Validación, modelo lineal n°1 de la muestra de cobre, radiación 900 W/m²

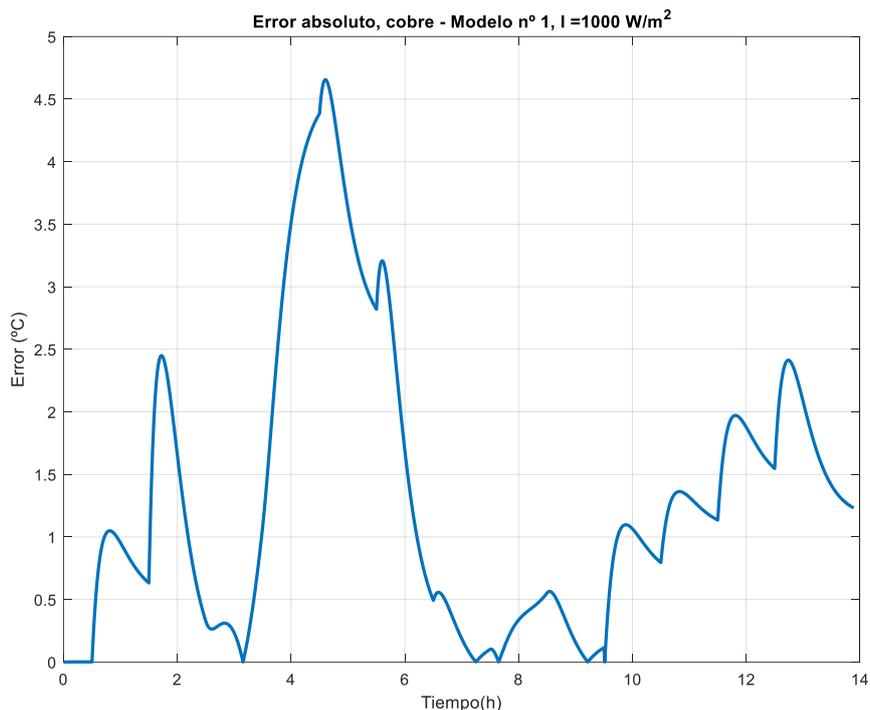


Figura 3.149. Error absoluto de validación, modelo lineal n°1 de la muestra de cobre, radiación 1000 W/m²

Finalmente, se muestra a continuación los índices de funcionamiento para las dos validaciones realizadas con los distintos niveles de radiación, donde se observa que la segunda validación tiene unos índices casi perfectos, ya que el valor de R^2 es prácticamente 1, la RMSE es menor a 2 °C y el error medio absoluto es de 1.3 °C, lo cual implica resultados muy buenos. Además, el error máximo que llega a darse en la simulación es de menos de 5 °C, lo cual a la escala de temperatura a la que se trabaja en el horno solar implica unos resultados excelentes. Por otra parte, la primera validación ofrece resultados también muy buenos, aunque no excelentes dado que la ganancia que posee el modelo no lineal durante el ensayo no es suficientemente alta como la del modelo lineal medio del intervalo.

Tabla 59. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°1 respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 900 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 1000 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	15.8209	4.6556
Error medio absoluto (°C)	6.7151	1.3294
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	8.1169	1.7713
R²	0.9889	0.9996

- Validación del modelo lineal n°2A, de 0 % al 13 % de apertura de persiana.

$$G_2(s) = \frac{16}{931.25s + 1}$$

Para este segundo modelo, se aplica la misma entrada en la apertura de la persiana que se aplicó con el modelo anterior, solo que se trabajará a distintos niveles de radiación, por debajo de los 800 W/m^2 , puesto que el anterior modelo tenía una ganancia que no era acorde para esta radiación y el mismo rango de apertura de la persiana. Por tanto, para una radiación igual a 600 W/m^2 , se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Figura 3.150 y Figura 3.151, donde se observa que el modelo lineal posee una ganancia superior a la que posee el modelo no lineal para ese nivel de radiación.

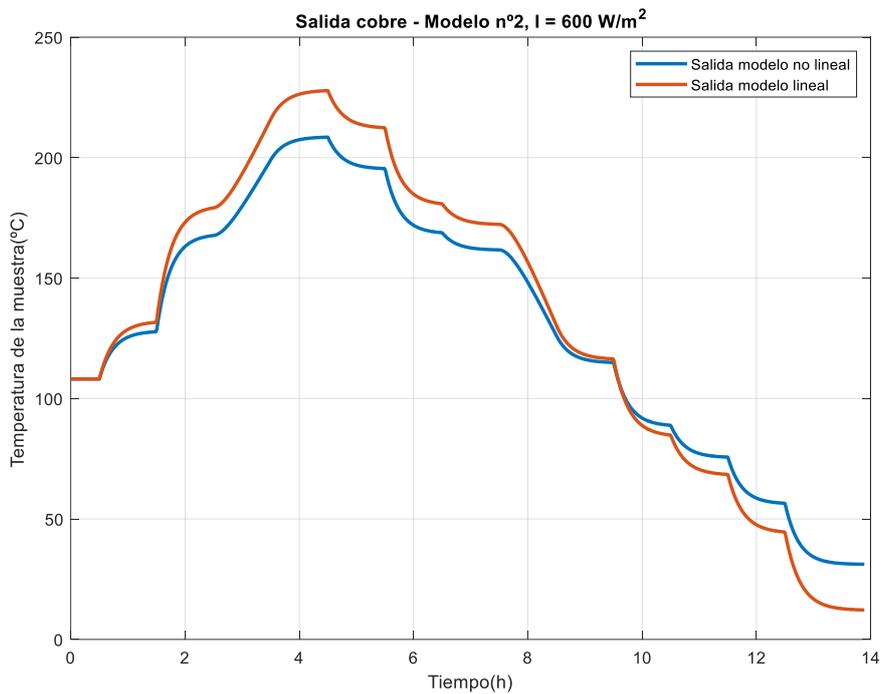


Figura 3.150. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 900 W/m^2

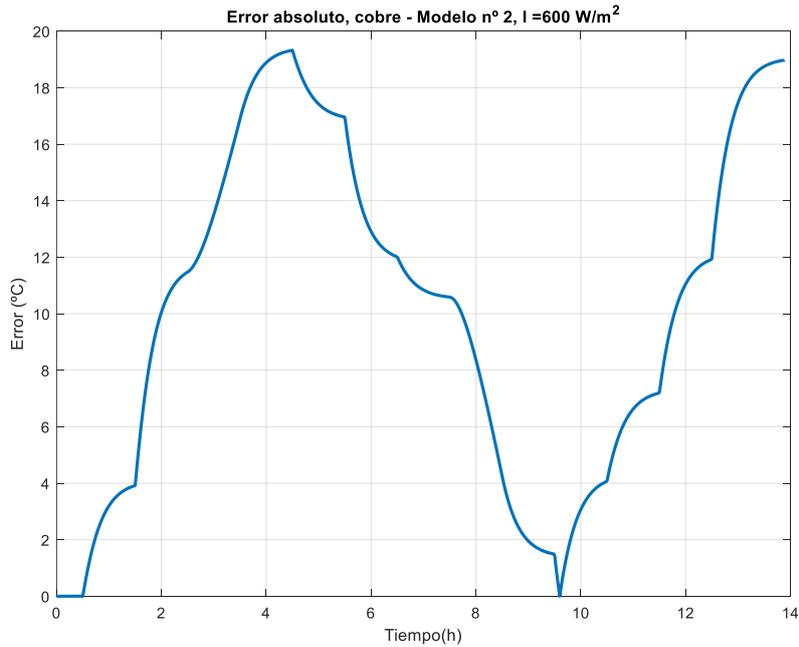


Figura 3.151. Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 600 W/m²

Se obtiene seguidamente la validación del segundo modelo lineal en este intervalo de apertura de la persiana para una radiación superior, de 700 W/m². Estos resultados se muestran en la Figura 3.152 y en la Figura 3.153, donde se aprecia como aumenta la ganancia del modelo no lineal puesto que en este rango de operación de la apertura de persiana, la radiación influye considerablemente, tal y como se pudo deducir del análisis en tres dimensiones de la ganancia y la constante de tiempo del modelo lineal en función de sus entradas para una temperatura ambiente de 25 °C (ver Figura 3.141 y Figura 3.142). Por tanto, se obtienen un muy buen ajuste entre modelo lineal y no lineal para este nivel de radiación.

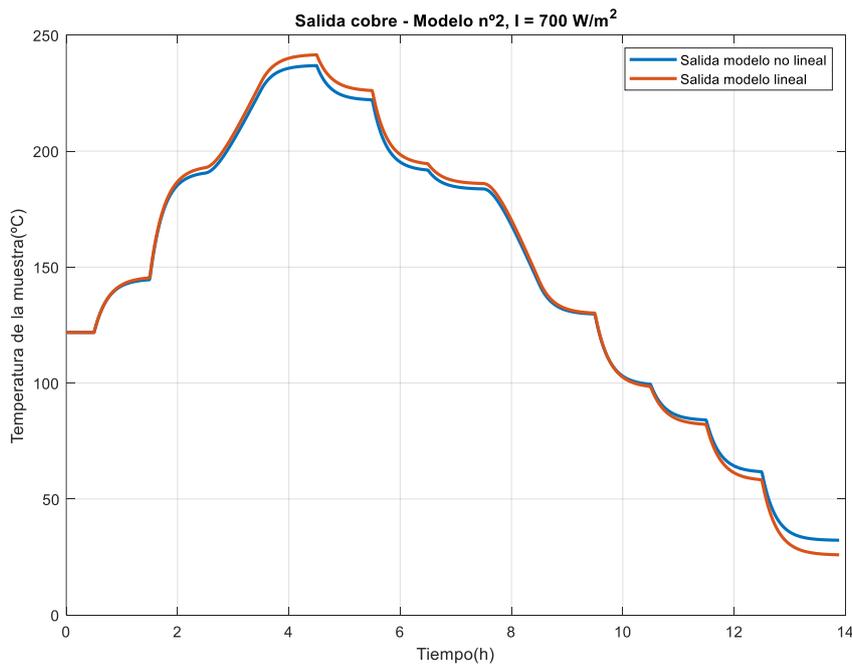


Figura 3.152. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 700 W/m²

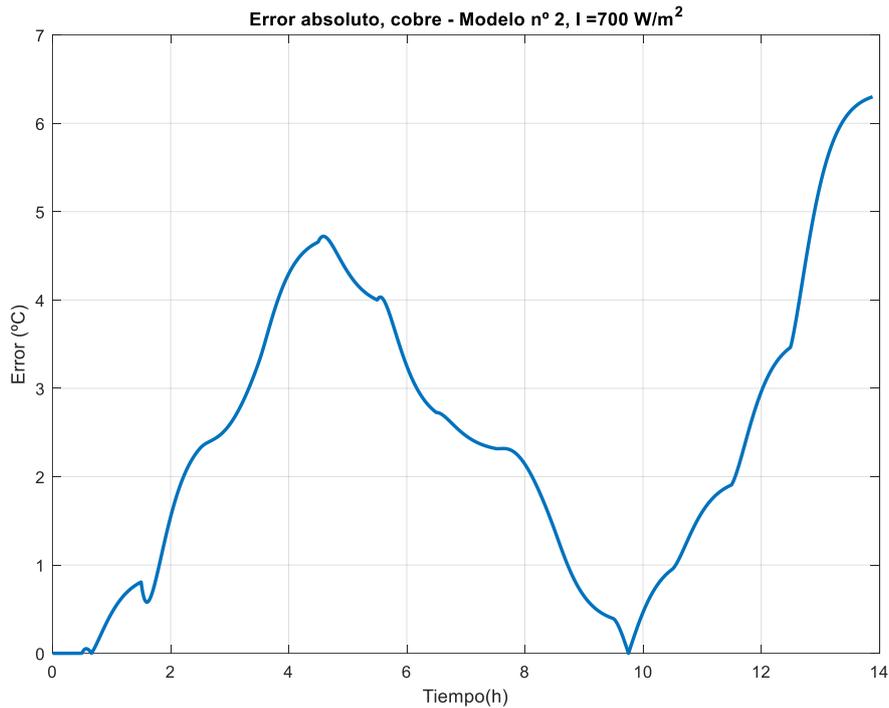


Figura 3.153. Error absoluto de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 700 W/m²

Finalmente, se muestran a continuación en la Tabla 60 los índices de funcionamiento, que dan una visión de la calidad del modelo en los distintos ensayos. Se podría decir que el segundo modelo lineal da buenos resultados para este rango de operación, donde se ha conseguido un ajuste muy bueno para el rango de radiación estudiado, sobre todo para el ensayo a 700 W/m² ya que los índices lo corroboran (error medio y RMSE menores a 3°C, error máximo no superior a 7 °C y un R² de prácticamente la unidad). El ensayo a 600 W/m² es bueno pero en este nivel de radiación, al modelo no lineal le falta ganancia para que se parezca al modelo lineal diseñado.

Tabla 60. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°2A respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 600 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 700 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	19.3265	6.3003
Error medio absoluto (°C)	10.1155	2.4537
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	11.7409	2.9623
R²	0.9514	0.9977

- Validación del modelo lineal n°2B, de 13 % al 20 % de apertura de persiana.

$$G_2(s) = \frac{16}{931.25s + 1}$$

Para el mismo modelo del rango anterior, ahora se trabaja en un rango de apertura de persiana superior y para todo el rango de la radiación solar. A continuación, se muestra la entrada introducida a los modelos en la apertura de la persiana en la Figura 3.154, para un punto de operación definido por una apertura de persiana de un 16.50 %.

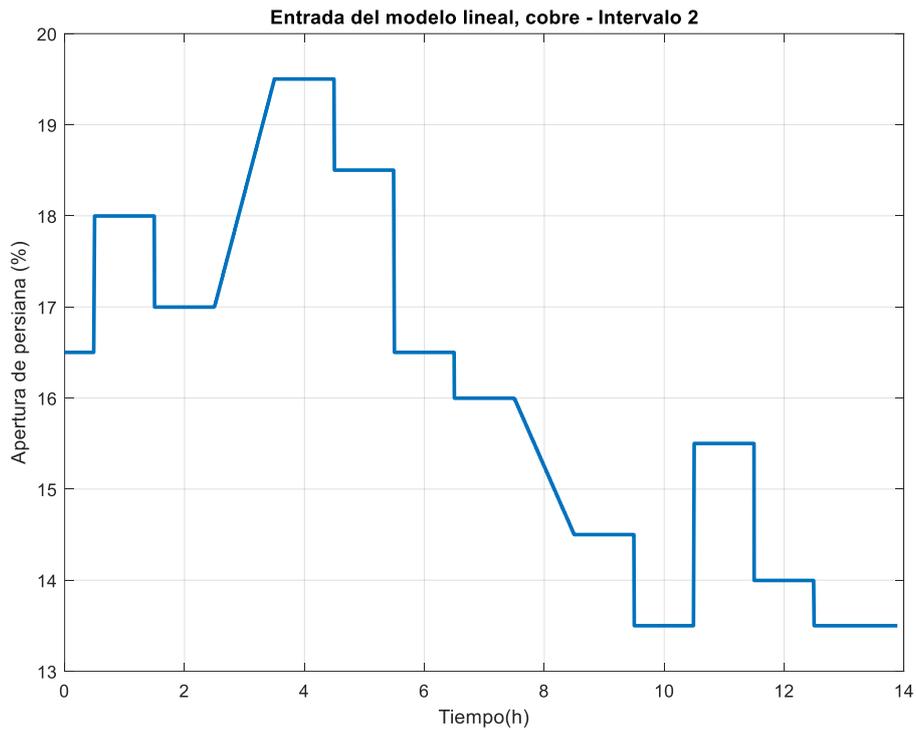


Figura 3.154. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°2B, muestra de cobre.

Para la entrada en la apertura de la persiana mostrada anteriormente y un nivel de radiación de 650 W/m^2 , se obtiene el resultado mostrado en la Figura 3.155 y Figura 3.156, donde se puede apreciar que el modelo lineal posee más ganancia que el modelo no lineal, para este nivel de radiación de 650 W/m^2 .

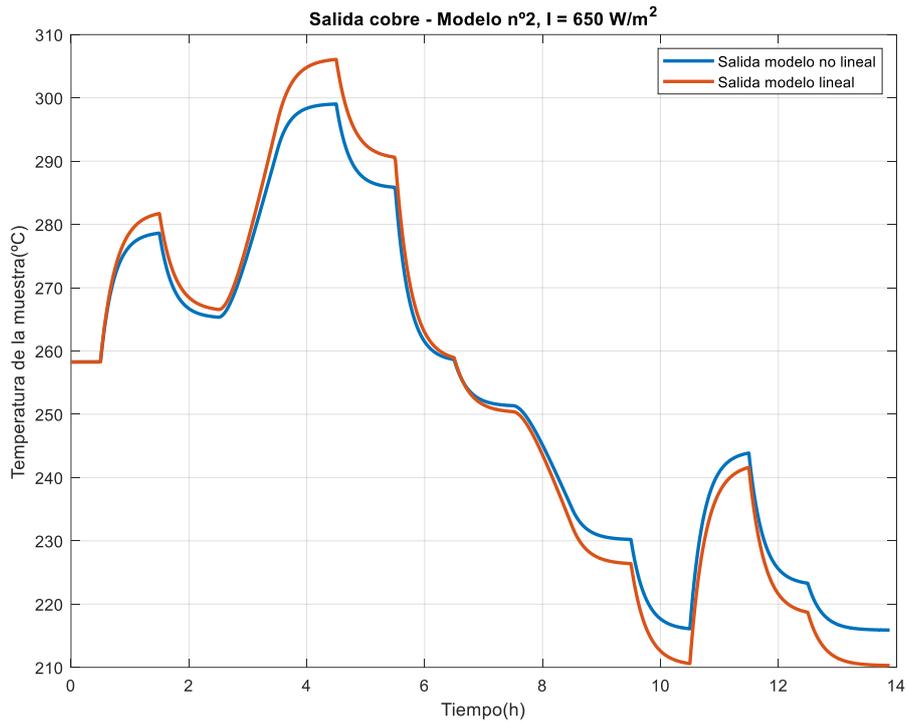


Figura 3.155. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m²

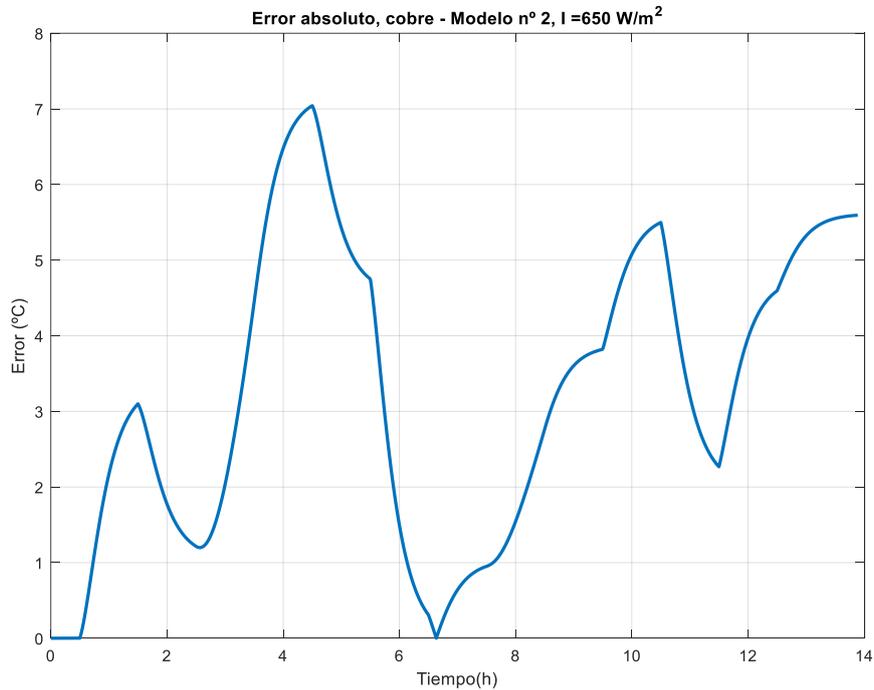


Figura 3.156. Error de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m²

Seguidamente, se obtiene el resultado de validar el modelo lineal para una radiación de 800 W/m², tal y como se muestra en la Figura 3.157 y Figura 3.158, cuyos resultados son muy buenos, ya que la dinámica del modelo lineal es muy parecida a la del no lineal

durante todo el ensayo, gracias que, respecto al ensayo anterior, se trabaja a mayor radiación y por tanto el modelo no lineal posee más ganancia.

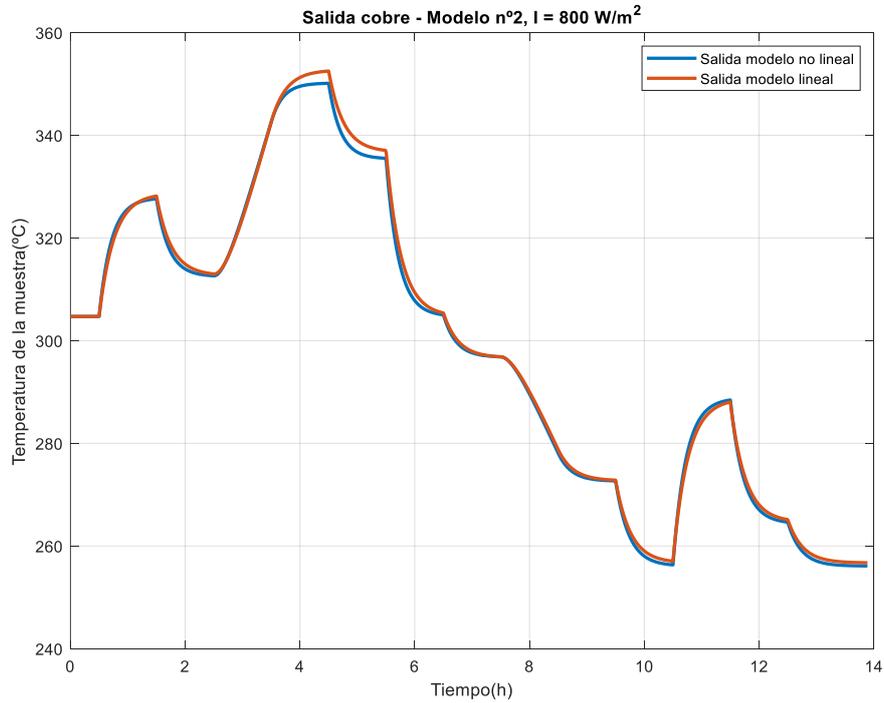


Figura 3.157. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m²

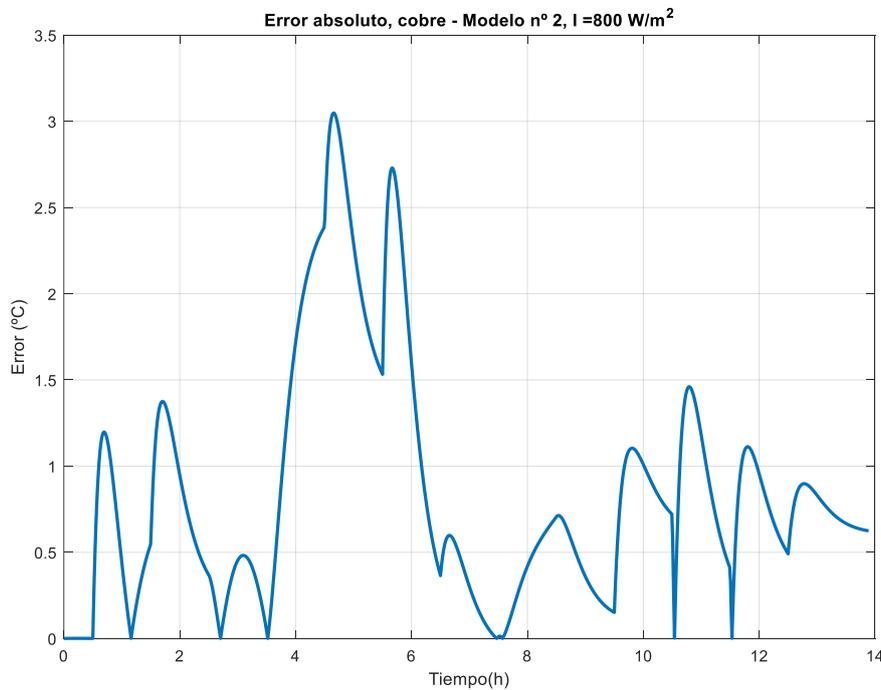


Figura 3.158. Error de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m²

Seguidamente se termina de validar el segundo modelo para un valor de radiación de 950 W/m², tal y como se muestra en la Figura 3.159 y la Figura 3.160, donde se aprecia un

muy buen resultado, aunque ligeramente peor que el anterior cuando la radiación solar era de 800 W/m^2 , puesto que ahora la ganancia del modelo no lineal para este nivel de radiación supera a la del modelo lineal medio para aperturas de persiana pequeñas, tal y como se aprecia al final del tiempo de la simulación.

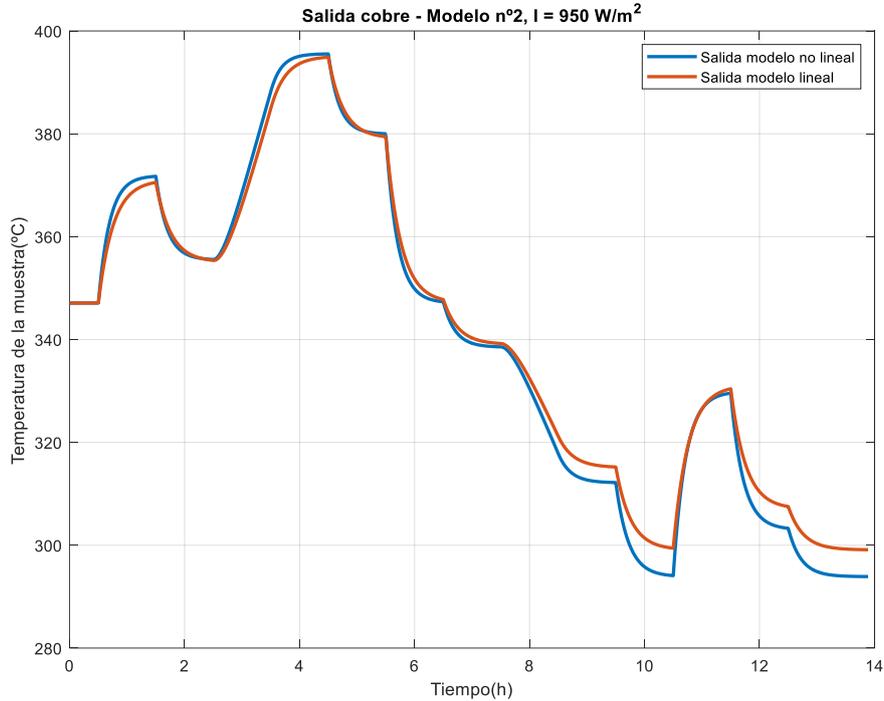


Figura 3.159. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m^2

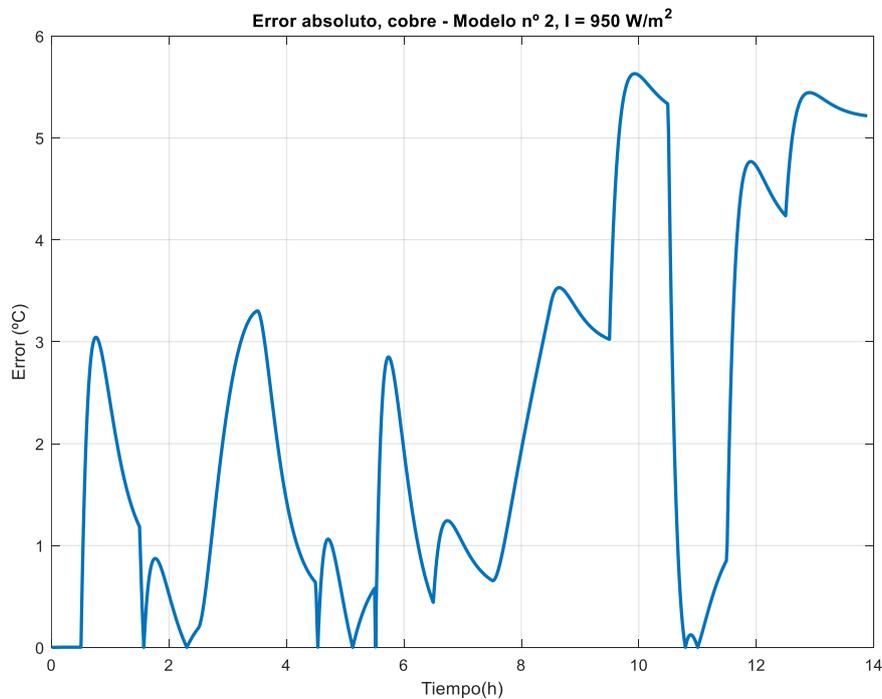


Figura 3.160. Error de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m^2

Por último, se muestran los índices de funcionamiento calculados para este modelo en los distintos ensayos de validación que, como se venía viendo en las gráficas, arroja resultados muy buenos para este intervalo. De hecho, el segundo ensayo es el que mejor se adapta al modelo no lineal, por lo que parece que el modelo lineal medio escogido reproduce casi exactamente la dinámica del modelo no lineal del horno para la muestra de cobre en esas condiciones de trabajo.

Tabla 61. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº2B respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	7.0428	3.0485	5.6302
Error medio absoluto (°C)	3.2526	0.8534	2.3147
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	3.7891	1.0998	5.6302
R²	0.9784	0.9986	0.9914

- Validación del modelo lineal nº3, de 20 % al 40 % de apertura de persiana.

$$G_3(s) = \frac{11}{693.75s + 1}$$

Se muestra a continuación la apertura de persiana introducida para la simulación en la

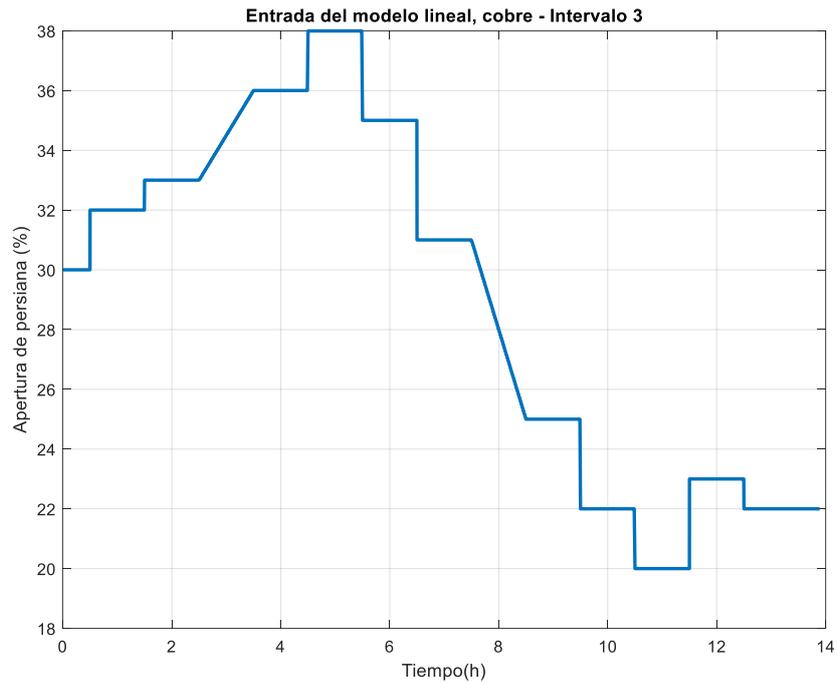


Figura 3.161. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°3, muestra de cobre.

Se muestra a continuación la salida de ambos modelos tras aplicar la entrada descrita en la Figura 3.161, mientras que en la Figura 3.162 y Figura 3.163 para un nivel de radiación de 650 W/m^2 , y el resultado es muy aceptable. Se destaca que el modelo lineal posee mayor ganancia a mayor apertura de la persiana, pero menor ganancia que el modelo no lineal a aperturas de persiana menores del intervalo.

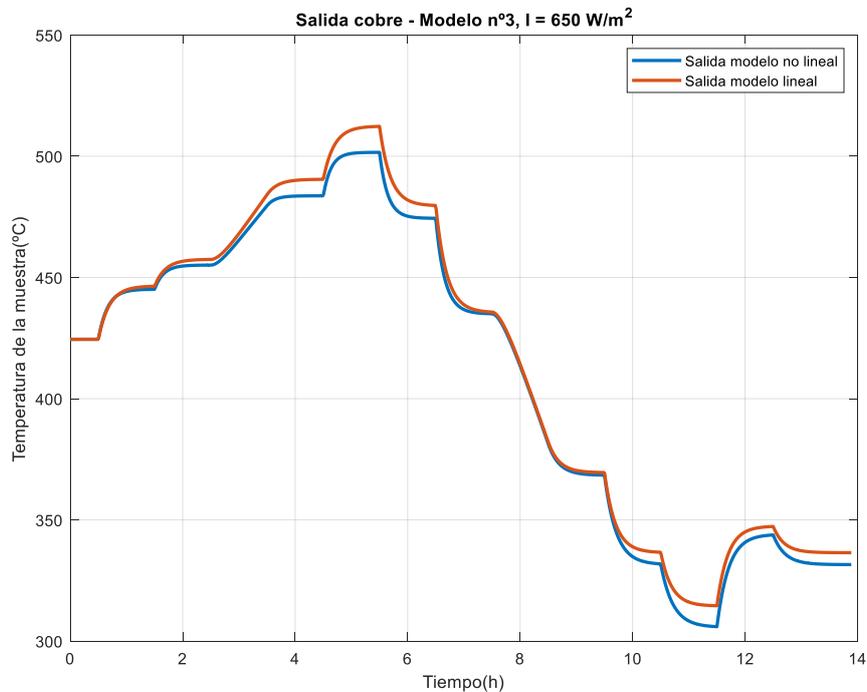


Figura 3.162. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m^2

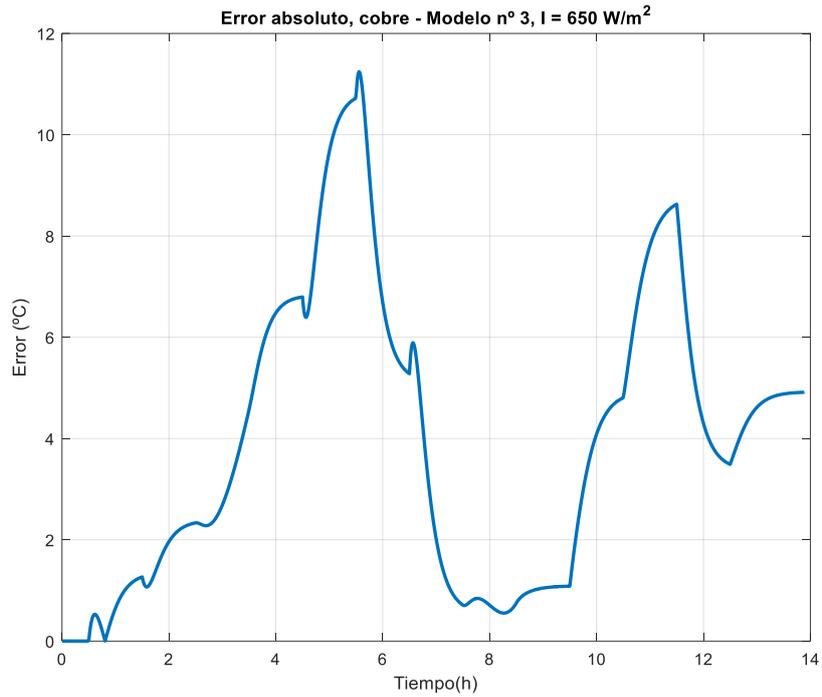


Figura 3.163 Error de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m².

A continuación, se muestra en la Figura 3.164 y Figura 3.165 el resultado para una radiación de 800 W/m², donde se aprecia que cada vez la influencia de la radiación es menos notoria en la dinámica del modelo no lineal, provocando que el error entre la salida del modelo lineal y del no lineal apenas varíe de una simulación a otra, solo unos grados más de error al aumentar la radiación.

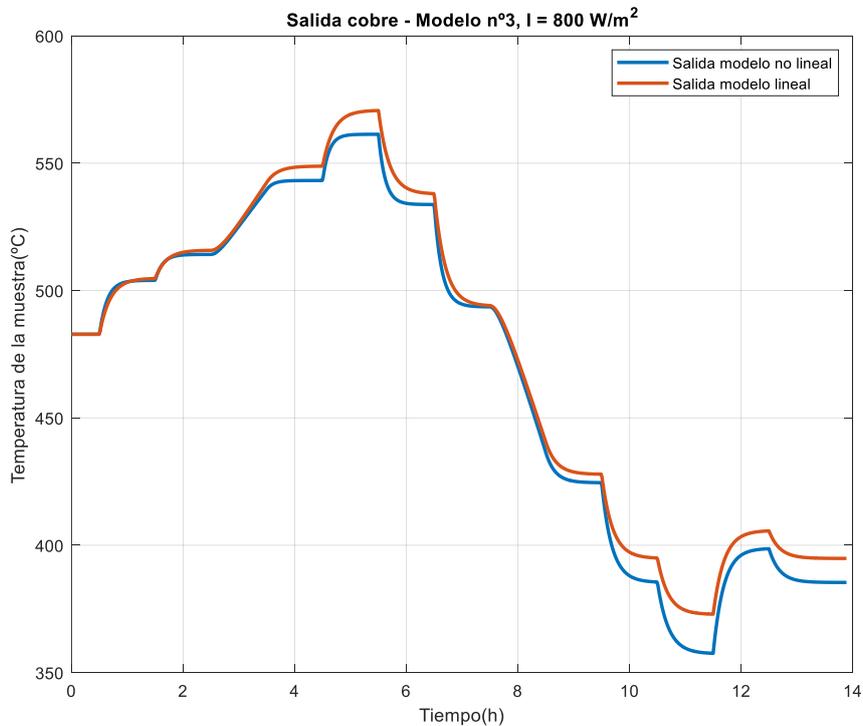


Figura 3.164. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m²

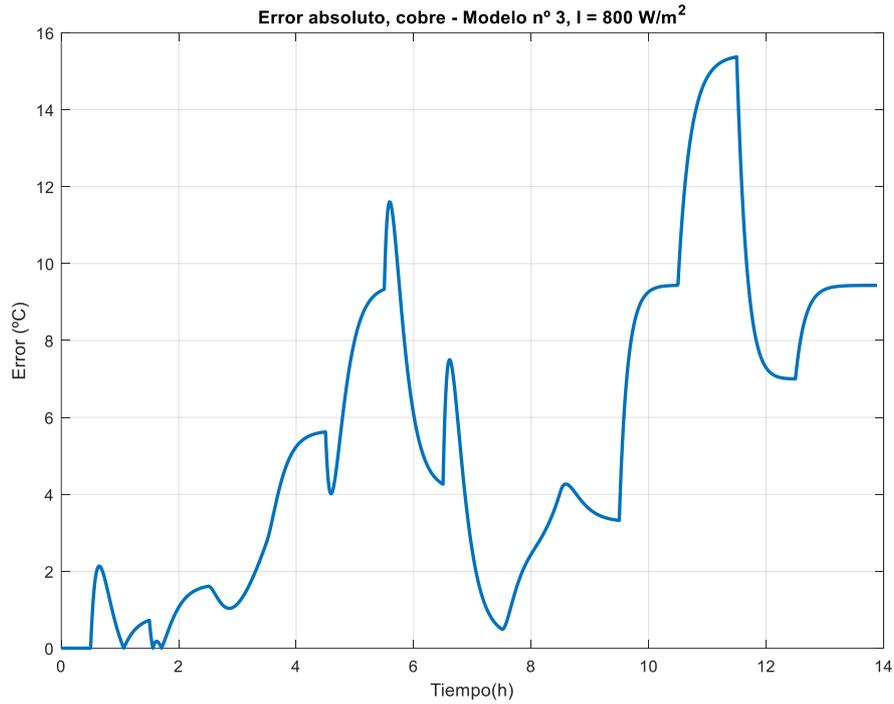


Figura 3.165. Error de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m².

Finalmente, se muestra en la Figura 3.166 y Figura 3.167 la validación del modelo lineal para una radiación de 950 W/m², donde se observa que aumenta algo más el error entre el modelo lineal y no lineal, pero apenas es significativo.

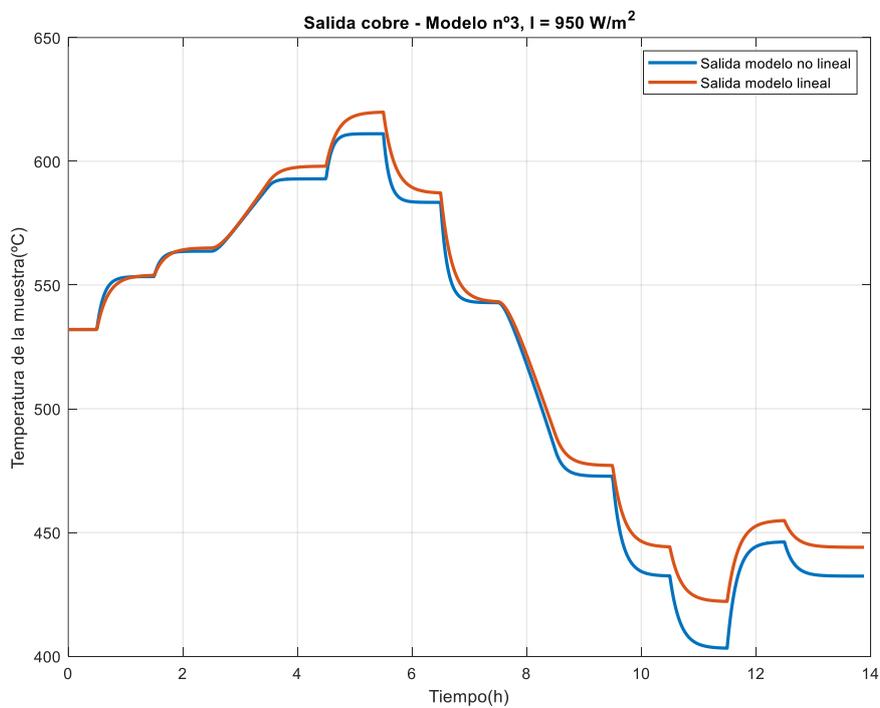


Figura 3.166. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m²

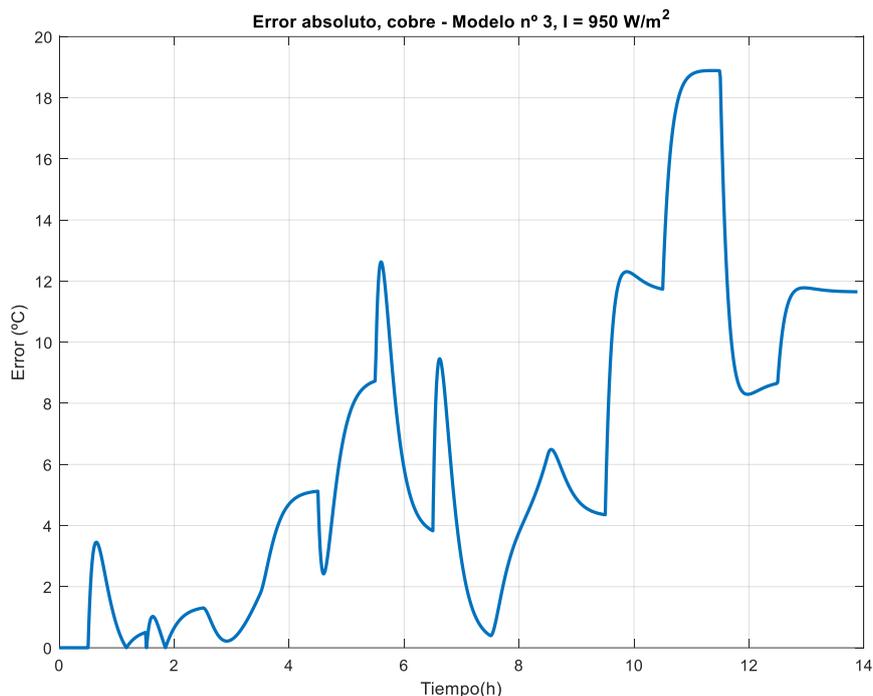


Figura 3.167. Error de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m².

Por último, se muestran los índices de funcionamiento para evaluar la calidad de los modelos en la Tabla 63. Estos resultados muestran lo que se viene comentando con anterioridad, y es que el nivel de radiación no influye tanto en la dinámica del modelo no lineal como lo hace en intervalos de menor porcentaje de apertura de la persiana. Sí es notorio destacar que el error en general es bajo y aceptable en estas simulaciones, y que conforme aumenta la radiación el modelo lineal funciona peor, lo que quiere decir que el modelo lineal estaría bien diseñado en este intervalo para radiaciones más bajas.

Tabla 62. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°3 respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	11.2450	15.3744	18.8881
Error medio absoluto (°C)	3.9605	5.4491	6.3408
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	4.9172	6.8311	8.2007
R²	0.9940	0.9893	0.9851

- Validación del modelo lineal n°4, de 40 % al 60 % de apertura de persiana.

$$G_4(s) = \frac{6}{456.25s + 1}$$

Al igual que en los anteriores intervalos, se procede a mostrar previamente la apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y al no lineal durante las distintas simulaciones con distintos niveles de radiación. Esta apertura de la persiana se muestra en la Figura 3.168, donde se ha partido de un punto de operación de 50 % en la apertura de la persiana.

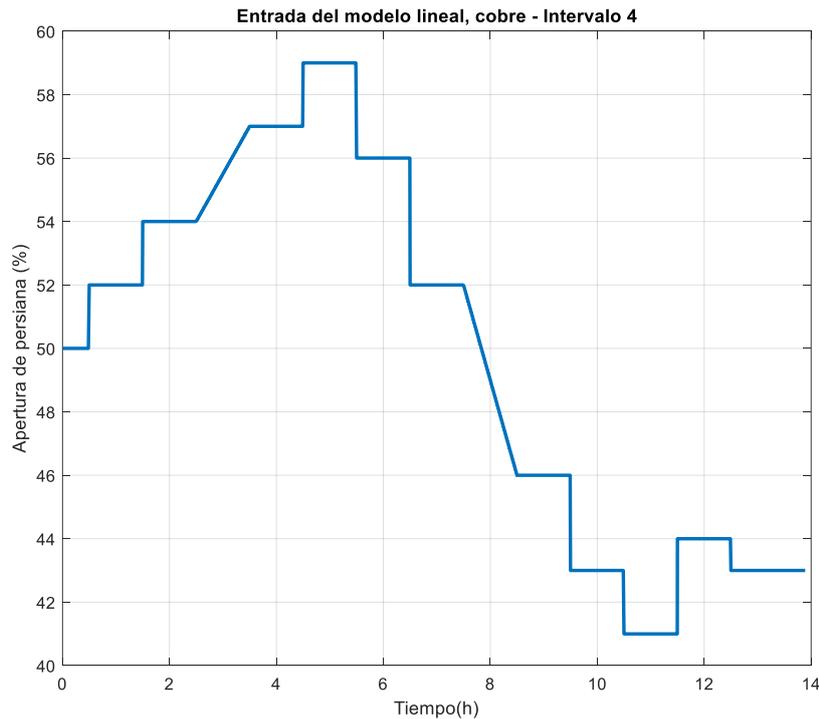


Figura 3.168. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°3, muestra de cobre.

A continuación, se muestra en la Figura 3.169 y Figura 3.170 el resultado de aplicar la entrada descrita para un valor de radiación de 650 W/m^2 , donde se observa claramente que el modelo lineal posee menor ganancia que el modelo no lineal, y que ésta diferencia se hace mayor conforme a menores aperturas de persiana se trabaja (hacia el final del tiempo de simulación).

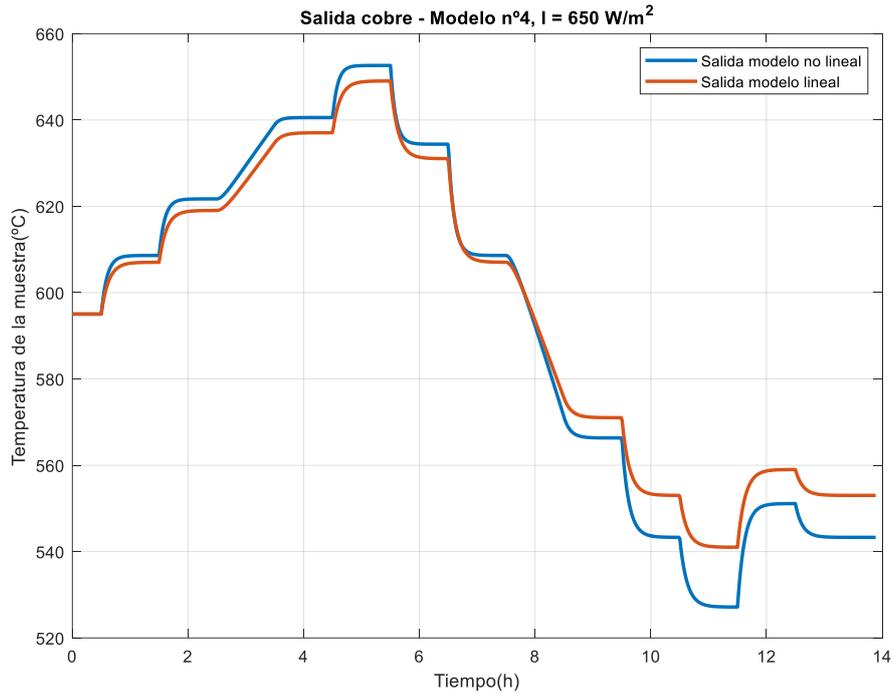


Figura 3.169. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m²

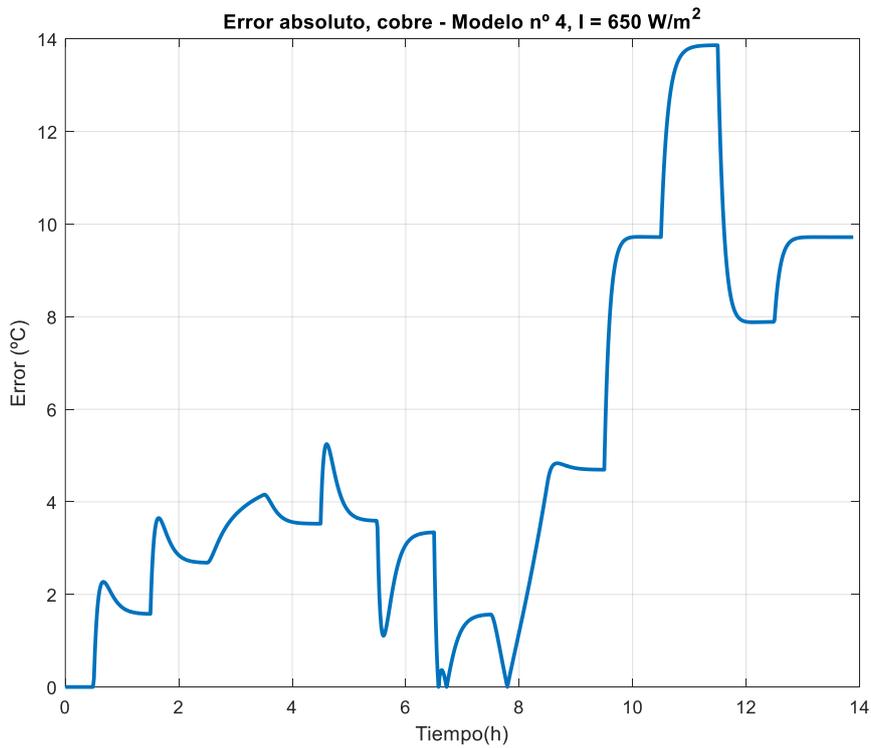


Figura 3.170. Error de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m².

Seguidamente, se valida el modelo lineal para una radiación superior e igual a 800 W/m², mostrándose el resultado en la Figura 3.171, mientras que en la Figura 3.172 se muestra el error absoluto entre ambas salidas. Se puede observar que la radiación influye poco en estos intervalos, como se viene comentando con anterioridad, en la dinámica del modelo.

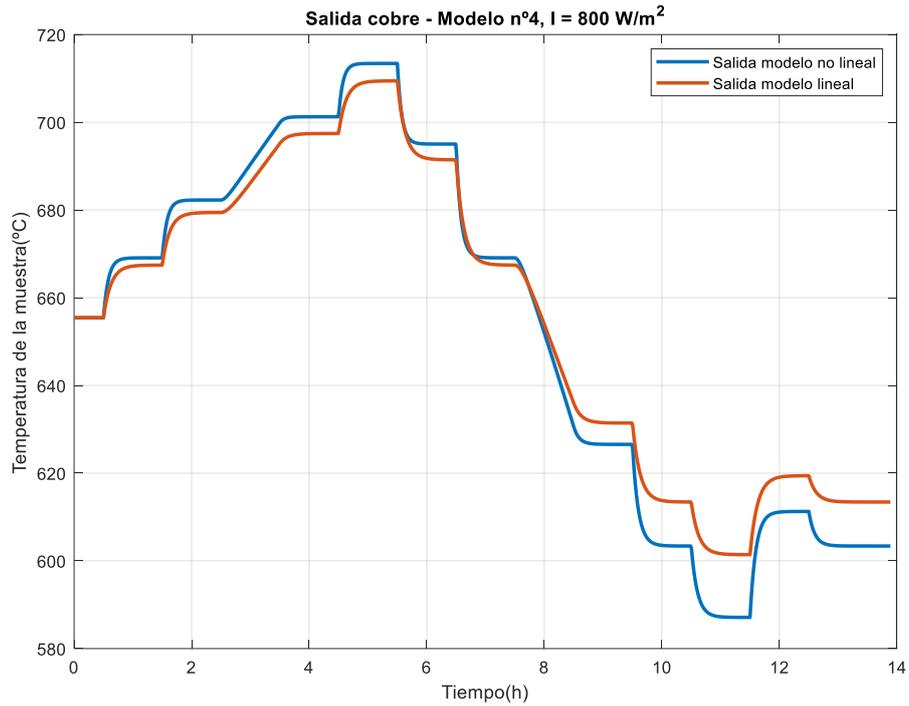


Figura 3.171. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m²

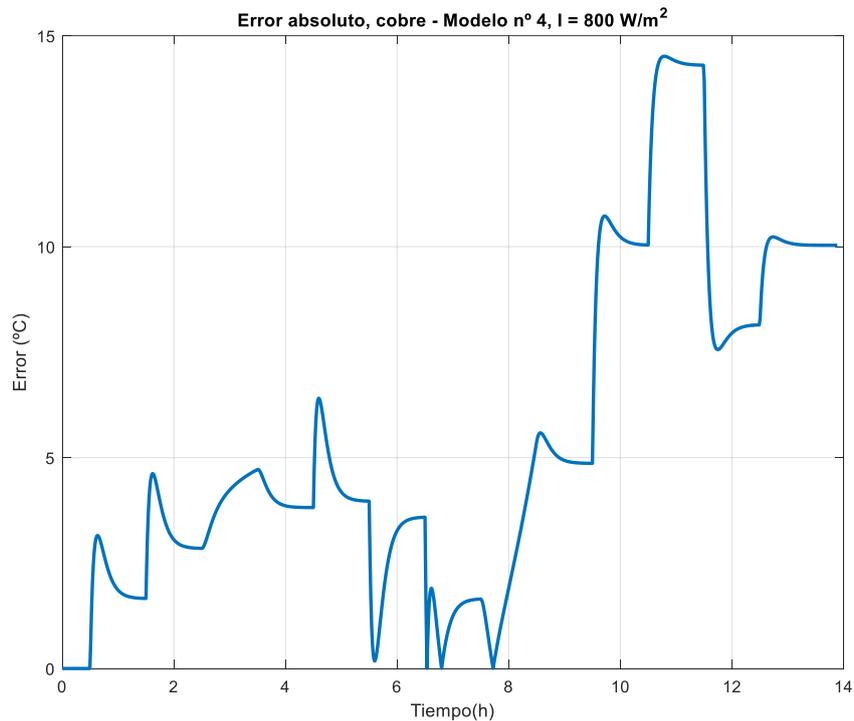


Figura 3.172. Error de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m².

Por último, se valida el modelo lineal para este intervalo para un valor de radiación de 950 W/m², Figura 3.173 y Figura 3.174 donde se observa que el error medio es pequeño, excepto en el límite inferior del intervalo (40 %) donde la ganancia del modelo no lineal es mayor que la del modelo lineal.

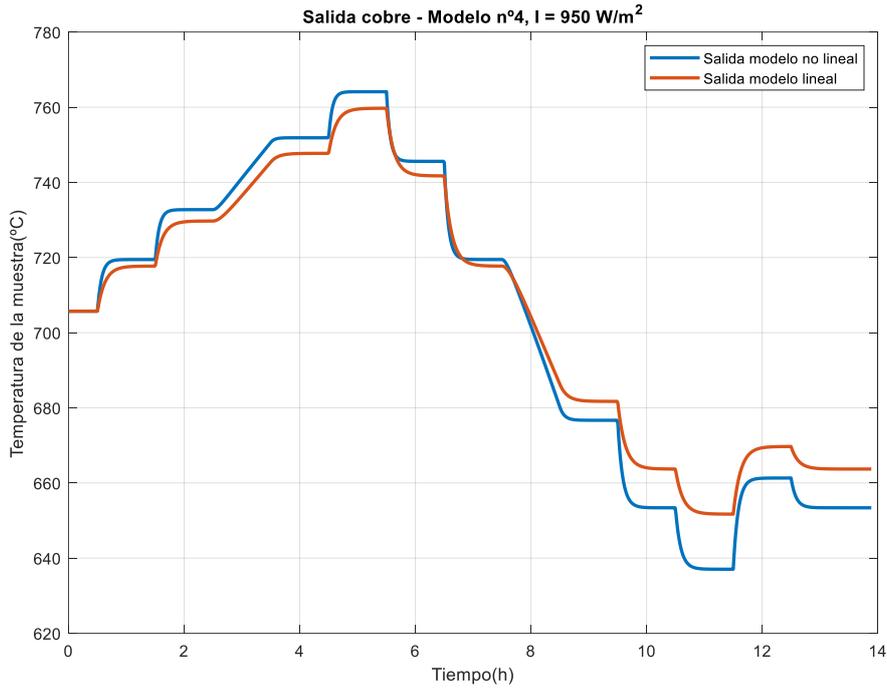


Figura 3.173. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m²

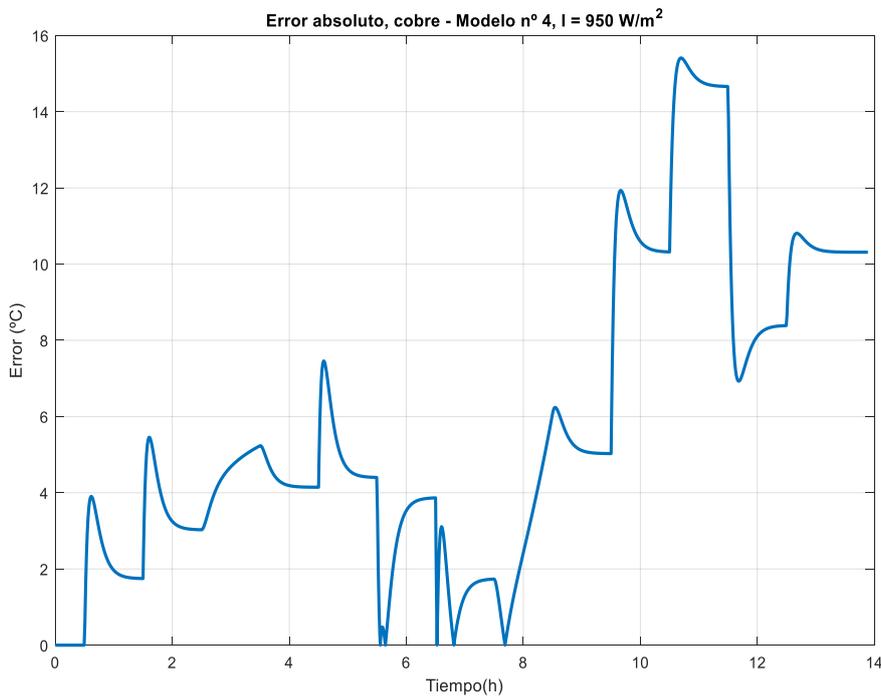


Figura 3.174. Error de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m².

Para concluir con este intervalo, se muestran en la Tabla 63 los índices de funcionamiento calculados para cada una de las simulaciones realizadas. En general, los índices obtenidos son aceptables, dado que por ejemplo el valor de R^2 es superior al 97 % en todos los casos, y los errores medios y la RMSE están en torno a 6 °C lo cual es un valor muy bajo dadas las temperaturas de trabajo.

Tabla 63. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°4 respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	13.8645	14.5139	15.4092
Error medio absoluto (°C)	5.0934	5.4500	5.7783
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	6.3472	6.7079	7.0335
R²	0.9754	0.9730	0.9707

- Validación del modelo lineal n°5, de 60 % al 100 % de apertura de persiana.

$$G_5(s) = \frac{6}{218.75s + 1}$$

A continuación, en la Figura 3.175, se muestra para el modelo n°6 la entrada introducida en la apertura de la persiana para realizar los distintos ensayos de validación para distintos niveles de radiación.

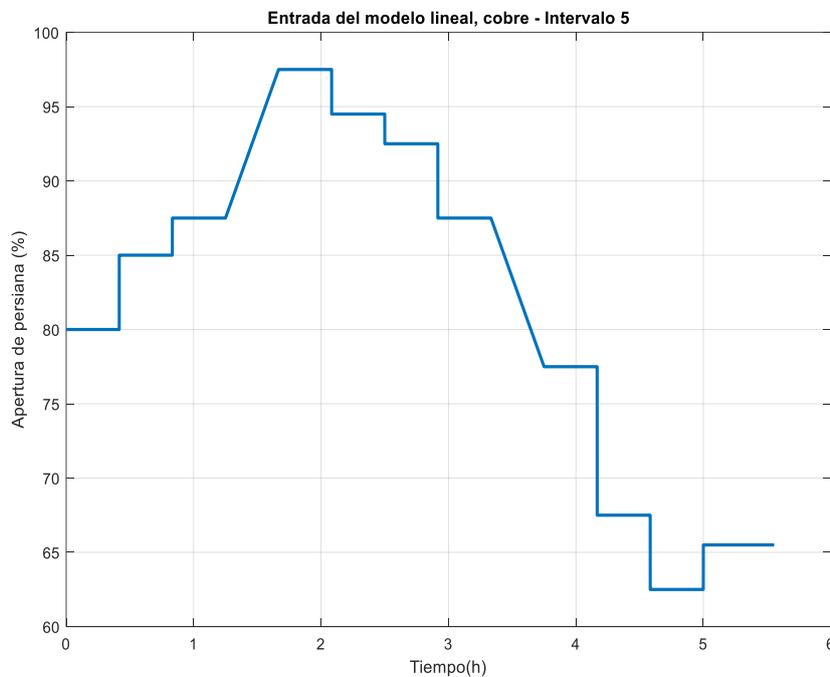


Figura 3.175. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°5, muestra de cobre.

Primeramente, se valida el modelo lineal con una radiación igual a 650 W/m^2 , lo cual devuelve un resultado como el que se muestra en la Figura 3.176, siendo la Figura 3.177 el error de validación en valor absoluto. Tal y como se observa, la ganancia y la constante de tiempo están muy poco ajustadas para este intervalo, lo cual es lógico sobre todo en el ámbito de la constante de tiempo, donde le intervalo que se pretende abarcar es muy amplio.

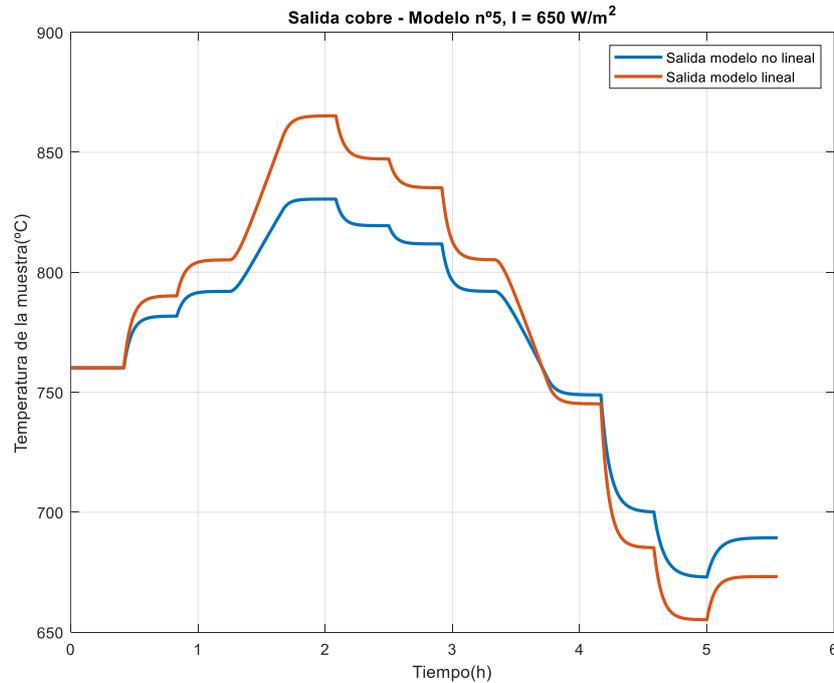


Figura 3.176. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m^2

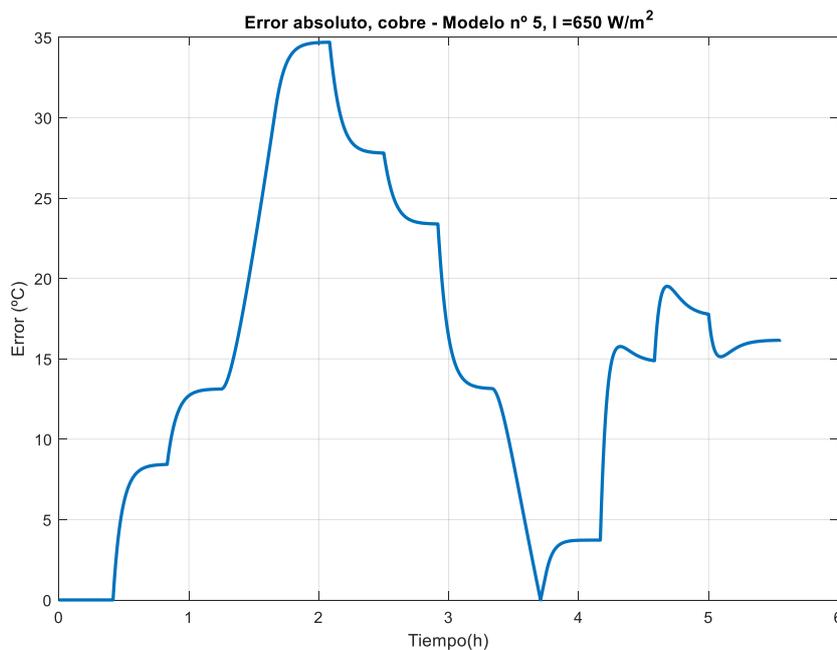


Figura 3.177. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de cobre, radiación 650 W/m^2

Se realiza a continuación el mismo ensayo, pero con un nivel de radiación de 800 W/m^2 , cuyo resultado se muestra a continuación en la Figura 3.178 y Figura 3.179, donde se aprecia que la radiación influye muy poco en la dinámica del modelo no lineal, pese a que reduce el error en algunos grados.

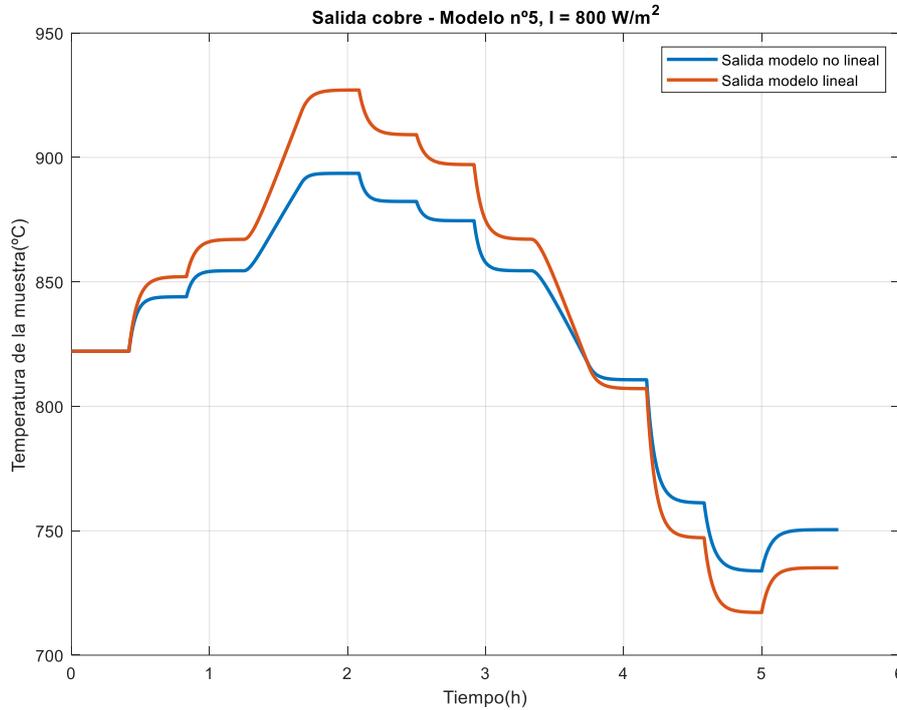


Figura 3.178. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m^2

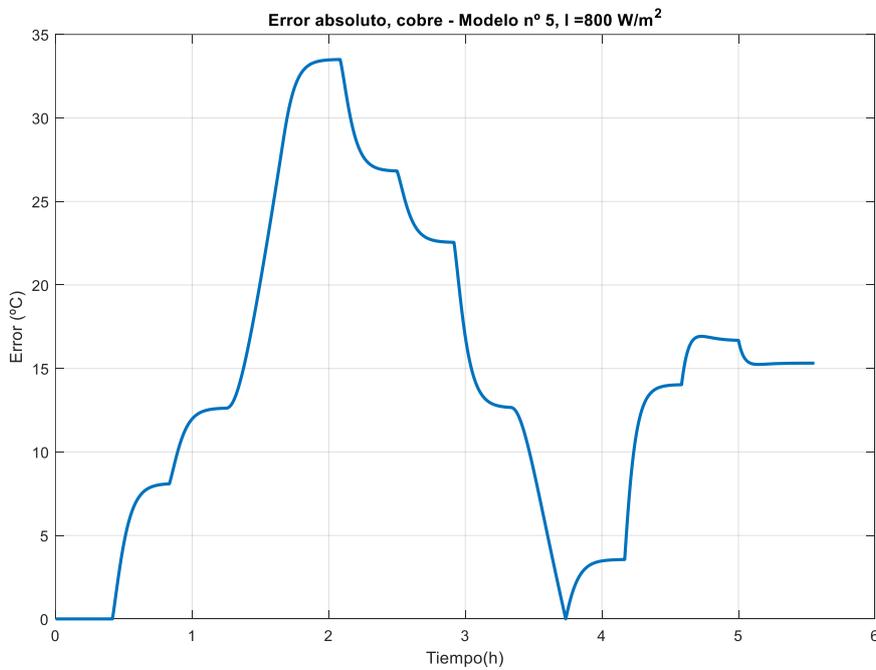


Figura 3.179. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de cobre, radiación 800 W/m^2

Por último, se valida el modelo con una radiación de 950 W/m^2 , que al igual que ocurría anteriormente, no refleja grandes cambios en la diferencia entre las salidas de los modelos.

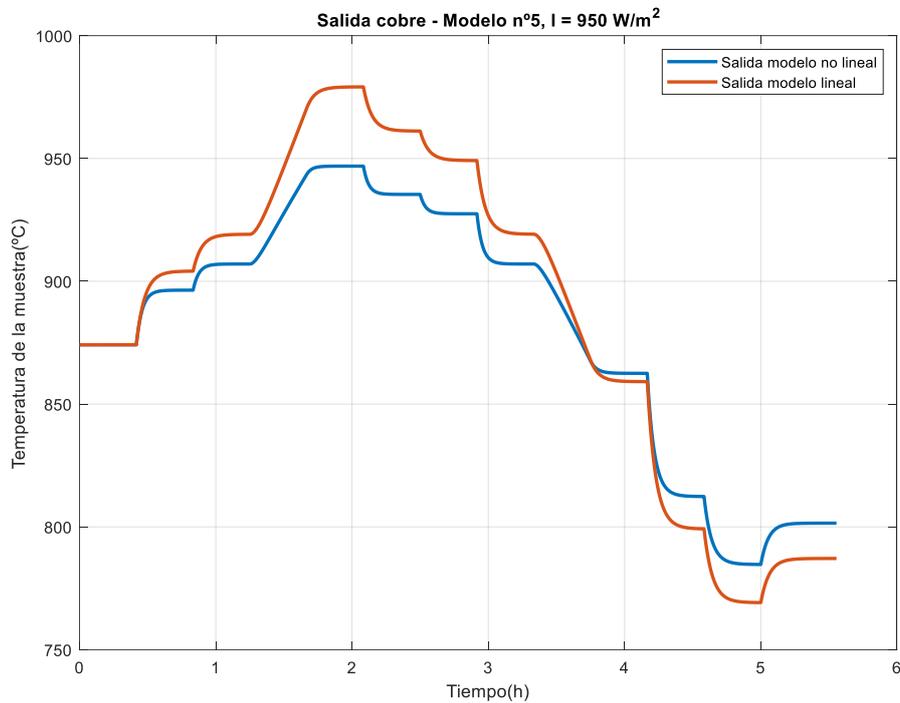


Figura 3.180. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m^2 .

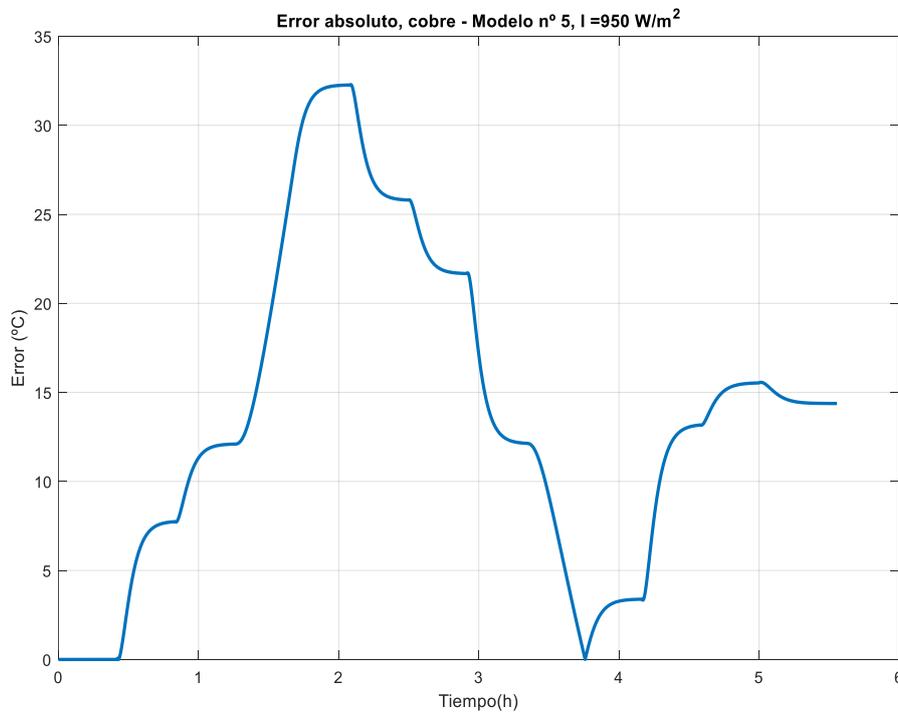


Figura 3.181. Error absoluto de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de cobre, radiación 950 W/m^2

Finalmente, se muestra a continuación en la Tabla 64 los índices de funcionamiento para el modelo n°5, obtenidos de las distintas validaciones para distintos niveles de radiación.

Se observa que los índices devuelven valores que no son del todo malos, ya que un error medio de 15 °C no es tan significativo cuando se trabaja a temperaturas tan altas como en el horno. Además, el valor de R^2 ofrece valores muy cercanos al 90 % en todos los casos, lo que implica que la dinámica del modelo lineal se corresponde con la del no lineal, aunque no de una manera muy ajustada.

Tabla 64. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°5 respecto del modelo no lineal, para la muestra de cobre en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	34.6925	33.5012	32.2858
Error medio absoluto (°C)	15.4537	14.6695	13.9033
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	18.2301	17.4062	16.6050
R²	0.8650	0.8812	0.8956

Para concluir con esta muestra, se podría extraer dados los resultados que el modelo lineal está diseñado de forma correcta para todos los intervalos, siendo quizás este último intervalo el que peor resultado proporciona. Como se dijo al principio, para conseguir mejores resultados se tendría que haber añadido un mayor número de intervalo puesto que así los modelos serían más precisos para el rango de operación establecido.

3.2.4 Carburo de silicio

Para terminar la parte de validaciones de los modelos lineales, se mostrará a continuación los resultados obtenidos para la muestra de carburo de silicio, cuyos parámetros característicos se resumen en la Tabla 65.

Tabla 65. Resumen de los parámetros característicos de la muestra de carburo de silicio que conforman el modelo.

Parámetros característicos de la muestra de carburo de silicio	Valor	Unidades
m_s	$3.33 \cdot 10^{-3}$	(Kg)
c_s (a 25 °C)	667	J/(Kg·K)
S_s	$7.0686 \cdot 10^{-4}$	m ²
α_a	0.1570	-
α_c	24.7772	W/(m ² ·K ⁴)

α_e	0.7286	-
------------	--------	---

Pese a los valores que se muestra en la Tabla 65 para el calor específico, este calor específico es para 25 °C y el modelo no lineal posee una dependencia de este parámetro con la temperatura del modelo. Por ello, se utiliza el valor de 962, que es el valor correspondiente a 227 °C tal y como se explicó en la parte de calibración del modelo no lineal para esta muestra (ver Tabla 23 donde se definió la dependencia del carburo de silicio con la temperatura de la muestra).

El proceso a seguir ha sido el mismo que con las anteriores muestras: obtener la dependencia de la ganancia y la constante de tiempo con la apertura de la persiana y la radiación solar, y en base a variaciones de estos parámetros del modelo lineal se diseñan intervalos y modelos medios para cada uno de dichos intervalos. Por tanto, se muestra a continuación en la Figura 3.182 una gráfica en tres dimensiones donde se representa la ganancia del modelo lineal para esta muestra en función de la apertura de persiana y la radiación solar, para una temperatura ambiente de 25 °C. Además, en la se muestra la Figura 3.183 la dependencia de la constante de tiempo del modelo lineal con ambas entradas del modelo también.

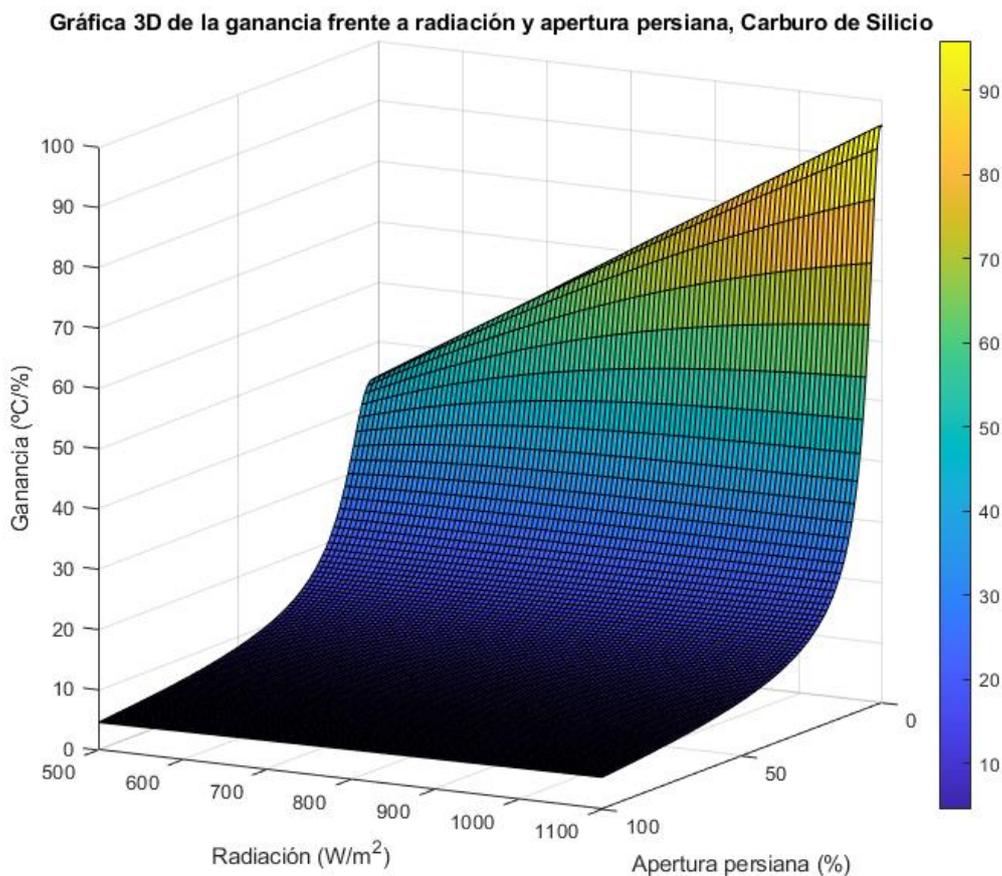


Figura 3.182. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m²). Muestra de carburo de silicio

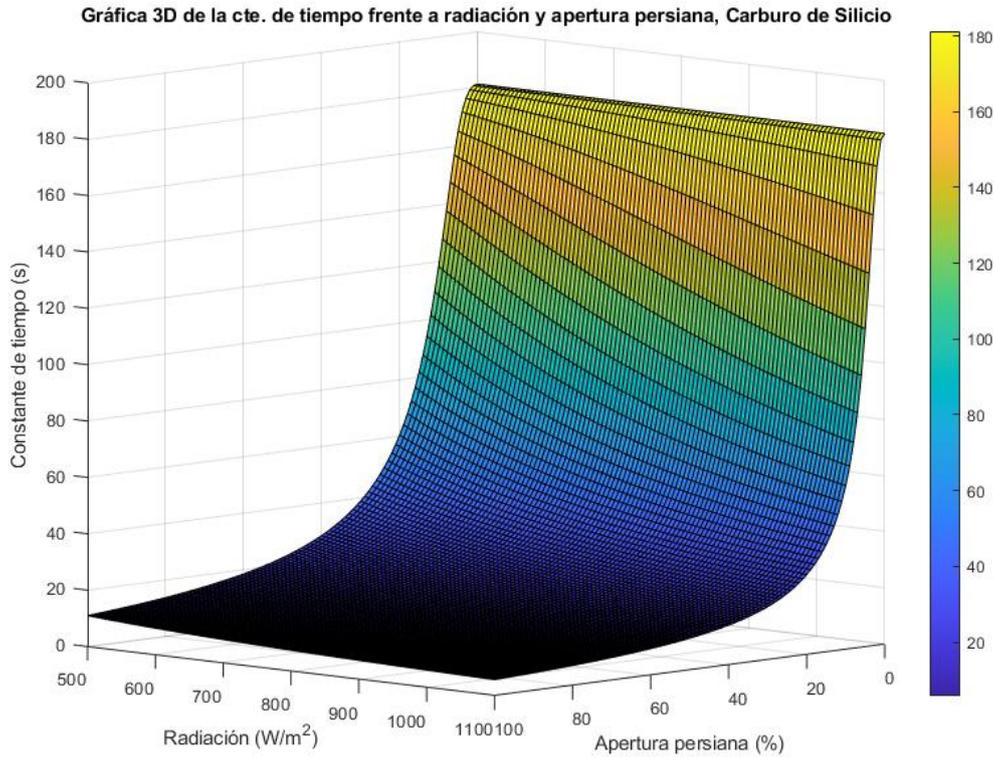


Figura 3.183. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2) Muestra de carburo de silicio

Se observa que la ganancia del modelo especialmente es muy dependiente a bajas aperturas de la persiana de la radiación solar, pudiendo tener para un mismo valor de apertura de persiana diferencias enormes en la ganancia solo disminuyendo o aumentando la radiación.

Se decide realizar cuatro cortes equidistantes en el eje Z (para el rango de valores que este eje toma) a la superficie en tres dimensiones (al igual que se hizo con las anteriores muestras), tanto de la ganancia como de la constante de tiempo, y obtener así intervalos principalmente en función de la apertura de la persiana que es la variable más dependiente en el modelo lineal, aunque se tendrá en cuenta la radiación tal y como verá a continuación. Primero, se muestran los cortes para la ganancia, donde se ha aplicado otro corte extra (mismo método que se hizo con la muestra del acero) para dividir el último intervalo en dos, puesto que abarcaba demasiado rango de operación de la muestra y conllevaría unos malos resultados.

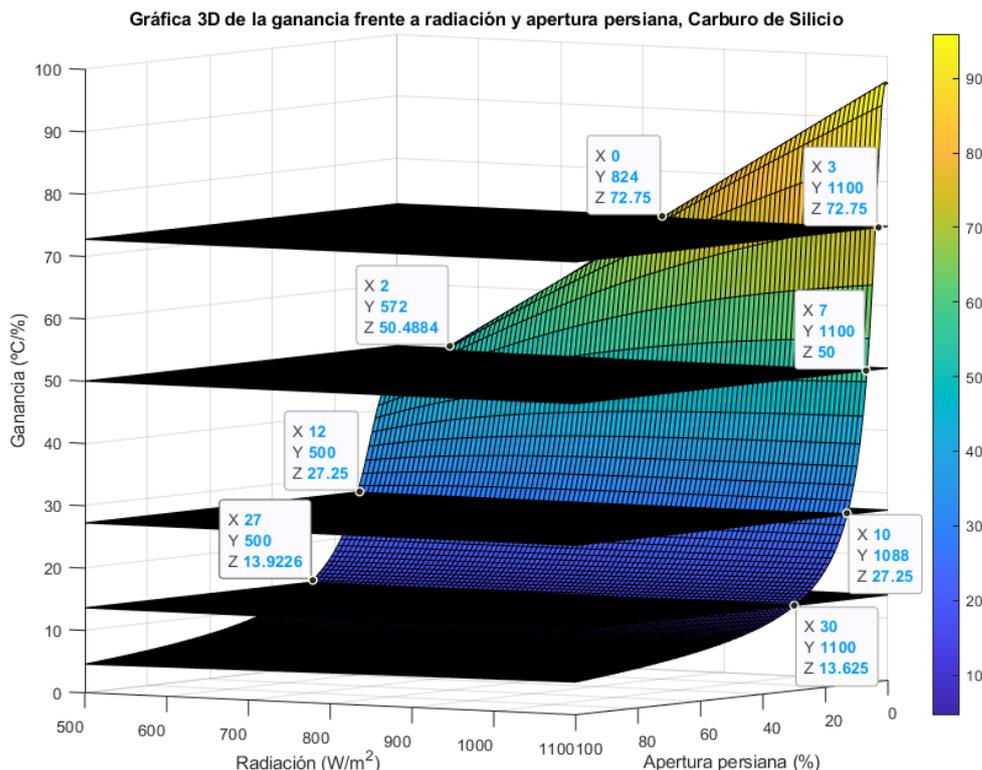


Figura 3.184. Gráfica en 3 dimensiones de la ganancia del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de carburo de silicio.

Estos cortes mostrados anteriormente desembocan en la Tabla 66 que se muestra a continuación, donde se obtienen las ganancias medias del modelo lineal para cada intervalo. Nótese que el primer intervalo, tal y como se muestra de la anterior división mediante los cortes con los planos perpendiculares al eje Z, que el primer modelo es válido solo para una radiación entre 800 y 1100 W/m^2 aproximadamente.

Tabla 66. Intervalos del rango de operación para la apertura de la persiana establecidos para la muestra de carburo de silicio y ganancia media de cada intervalo.

Nº de intervalo	Límites de intervalos de ganancia (°C/%)		Límites de intervalos de apertura de persiana (%)		$k_{U,media}$ (°C/%)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	95.50	72.75	0	3	84.125
2	72.75	50	3	7	61.375
3	50	27.25	7	15	38.625
4	27.25	13.625	15	27	20.4375
5	13.625	4.50	27	100	9.0625

Se realiza a continuación el mismo método para la constante de tiempo, dividiendo el intervalo de menor altura en el eje Z debido al rango de operación tan grande que abarca. El resultado mostrado en la Figura 3.185 con los cortes aplicados da lugar a la distribución de constantes de tiempo media según la apertura de la persiana que se da en la Tabla 67.

Nótese que esta distribución y la anterior de la ganancia ha sido realizada de tal manera que sea más fácil cruzar posteriormente los datos y obtener un número sensato de intervalos, para simplificar este proceso.

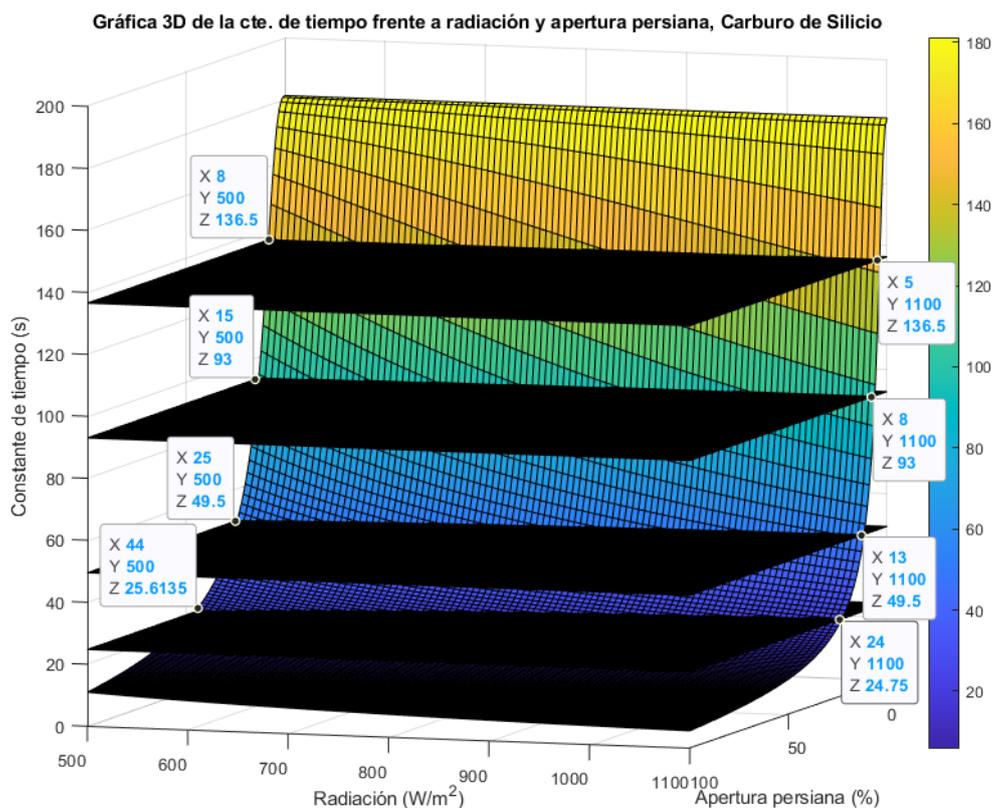


Figura 3.185. Gráfica en 3 dimensiones de la constante de tiempo del modelo lineal en función de la apertura de la persiana (%) y de la radiación (W/m^2), con planos de corte perpendiculares al eje Z para obtener los intervalos. Muestra de carburo de silicio

Tabla 67. Intervalos del rango de operación establecidos para la muestra de carburo de silicio, y constante de tiempo media para cada uno.

Nº de intervalo	Límites de intervalos de constante de tiempo (s)		Límites de intervalos de apertura de persiana (%)		τ_{media} (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	180	136.50	0	7	158.25
2	136.50	93	7	15	114.75
3	93	49.50	15	27	71.25
4	49.50	24.75	27	40	37.125
5	24.75	6	40	100	15.375

Como se puede observar, y al igual que sucedió con las muestras de ensayo anteriores, los intervalos han sido establecidos de forma aproximada debido a que la línea de corte que se produce entre la superficie (ya sea de la ganancia o de la constante de tiempo) y los planos de corte perpendiculares al eje Z son líneas curvas y no rectas, por lo que el intervalo es más difícil de acotar.

Finalmente se muestra en la Tabla 68 los modelos lineales obtenidos tras cruzar los datos de la Tabla 66 y Tabla 67 para la muestra de carburo de silicio, que como se puede observar, da lugar a 7 modelos lineales distintos. Nótese que el primer modelo es válido solamente para una radiación de 1100 a 800 W/m², mientras que el segundo está dividido en dos debido a que para el rango de operación de 0 % a 3 % la ganancia que se debe usar es de 61.375 °C/%, tal y como se explicó anteriormente al realizar los cortes en la ganancia.

Tabla 68. Modelos lineales estimados para el rango de operación de la muestra de carburo de silicio.

Nº de modelo	Apertura de persiana (%)		Radiación (W/m ²)		Ganancia, k_U (°C/%)	Constante de tiempo, τ (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
1	0	3	1100	800	84.125	158.25
2	0	3	800	500	61.375	158.25
2B	3	7	Todo el rango		61.375	158.25
3	7	15	Todo el rango		38.625	114.75
4	15	27	Todo el rango		20.4375	71.25
5	27	40	Todo el rango		9.0625	37.125
6	40	100	Todo el rango		9.0625	15.375

- Validación del modelo lineal nº1, de 0 % al 3 % de apertura de persiana.

$$G_1(s) = \frac{84.125}{158.25s + 1}$$

Primeramente, se muestra la entrada introducida al modelo lineal y no lineal en la Figura 3.186, que será además la que se utilice para validar el modelo nº 2^a, puesto que funciona para el mismo intervalo de apertura de persiana que este.

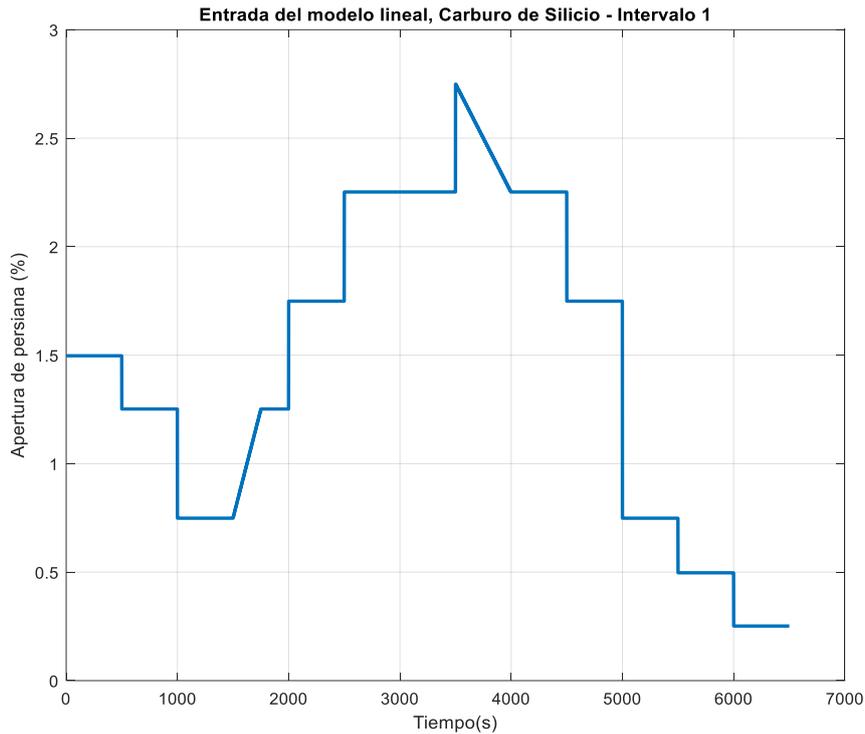


Figura 3.186. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°1 y 2A, muestra de carburo de silicio.

Dada la entrada anterior, para un valor de radiación de 900 W/m^2 , el resultado que se obtiene es el mostrado en la Figura 3.187 y Figura 3.188, que parece ser bastante bueno. Se observa que la ganancia del modelo no lineal es algo inferior a la que posee el modelo lineal cuando se trabaja en aperturas de persiana lejanas al punto medio del intervalo.

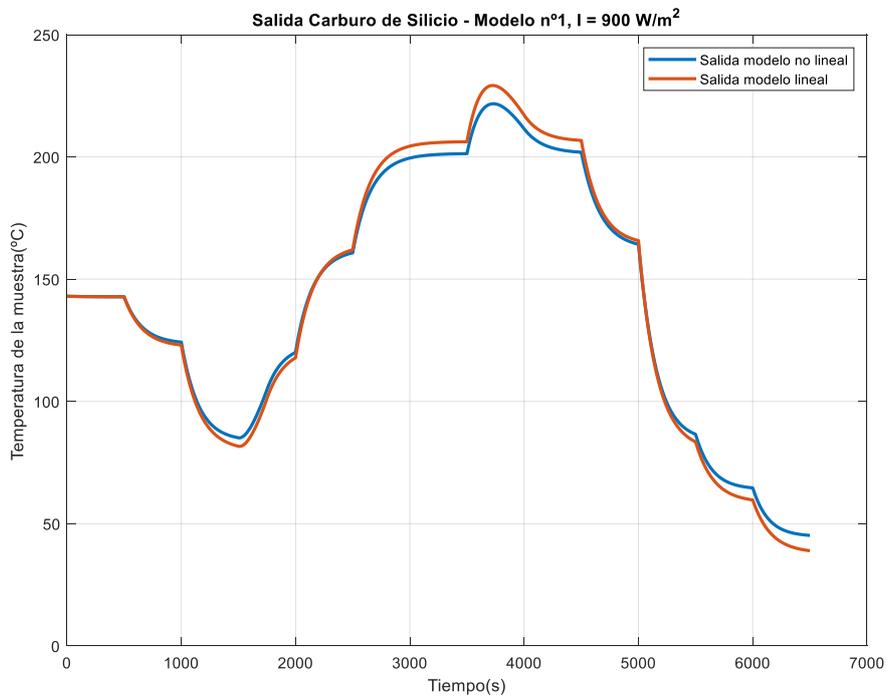


Figura 3.187. Validación, modelo lineal n°1 de la muestra de carburo de silicio, radiación 900 W/m^2 .

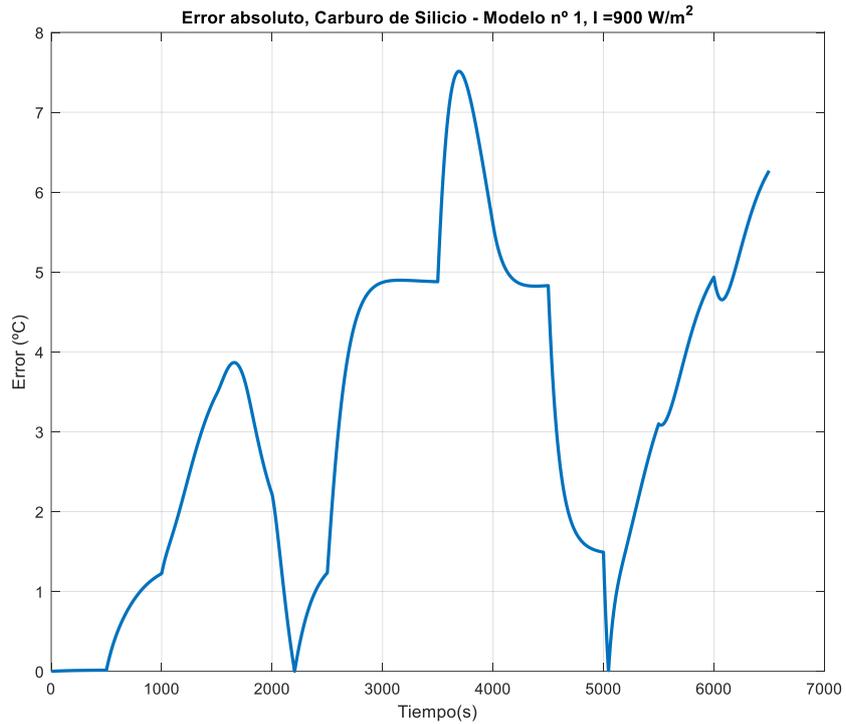


Figura 3.188. Error de validación, modelo lineal n°1 de la muestra de carburo de silicio, radiación 900 W/m².

Seguidamente, se valida el modelo n°1 para la muestra de carburo de silicio para un nivel de 1000 W/m², tal y como se muestra en la Figura 3.189 y en la Figura 3.190, donde se aprecia que para un nivel mayor de radiación, el modelo lineal se ajusta mejor a la salida que tiene el modelo no lineal, ya que este último ha adquirido más ganancia al incrementarse la radiación.

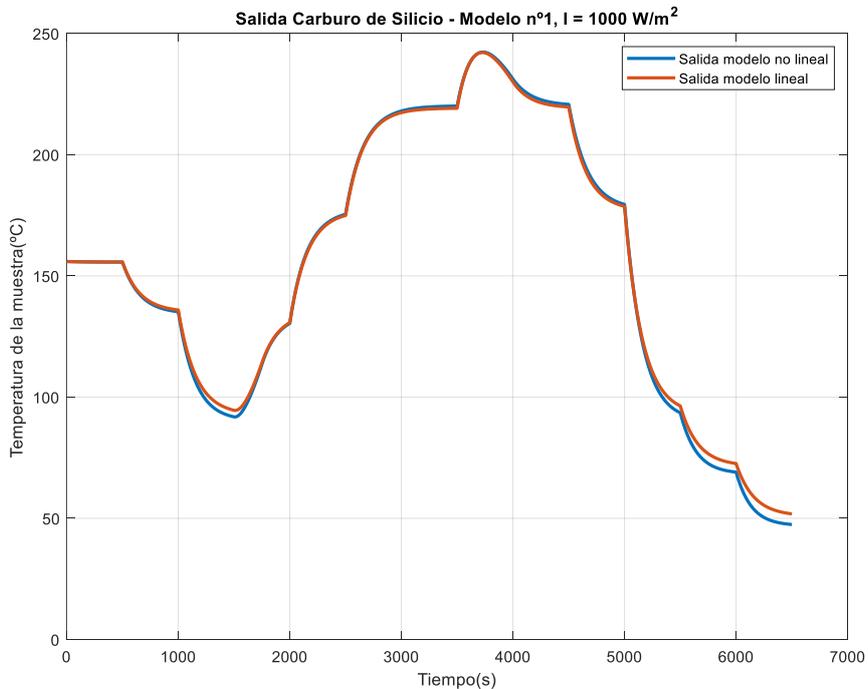


Figura 3.189. Validación, modelo lineal n°1 de la muestra de carburo de silicio, radiación 1000 W/m².

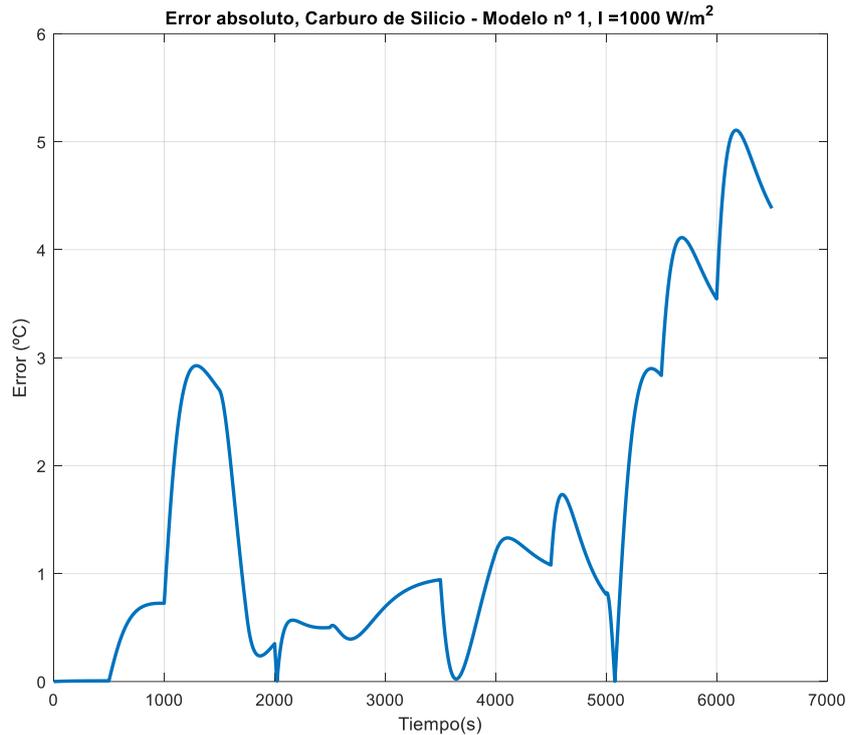


Figura 3.190. Error de validación, modelo lineal n°1 de la muestra de carburo de silicio, radiación 1000 W/m².

Para concluir, se muestran los índices de funcionamiento en la Tabla 69 para cada una de las dos simulaciones, donde se aprecia que los resultados obtenidos por este modelo para el rango de operación dado son realmente buenos (siendo la segunda validación para la radiación de 1000 W/m² aún mejor que la primera). Esta afirmación se apoya en los bajos valores de los errores medios y la RMSE (en torno a 2°C en el segundo caso), un error máximo absoluto menor a 8 °C y un R² bastante cercano o casi igual a 1.

Tabla 69. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°1 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 900 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 1000 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	7.5131	5.1065
Error medio absoluto (°C)	3.1704	1.4970
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	3.7678	2.0694
R²	0.9949	0.9987

- Validación del modelo lineal n°2A, de 0 % al 3 % de apertura de persiana.

$$G_2(s) = \frac{61.375}{158.25s + 1}$$

Para validar este modelo se utiliza la misma entrada que se mostró en la Figura 3.186. Así a continuación en la Figura 3.191 y Figura 3.192 se muestra el resultado de aplicar dicha entrada al modelo lineal n° 2 para un valor de radiación de 600 W/m².

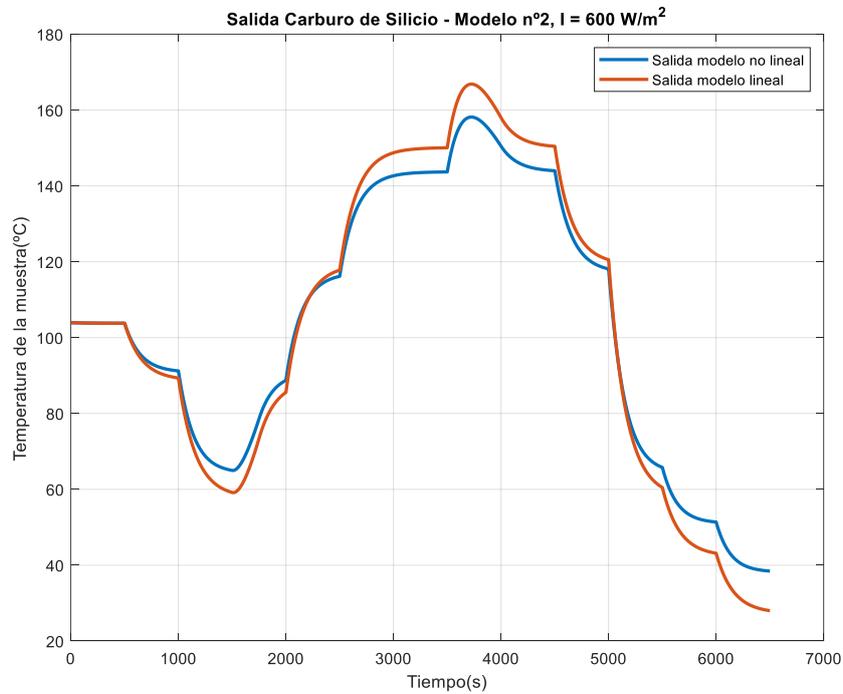


Figura 3.191. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 600 W/m².

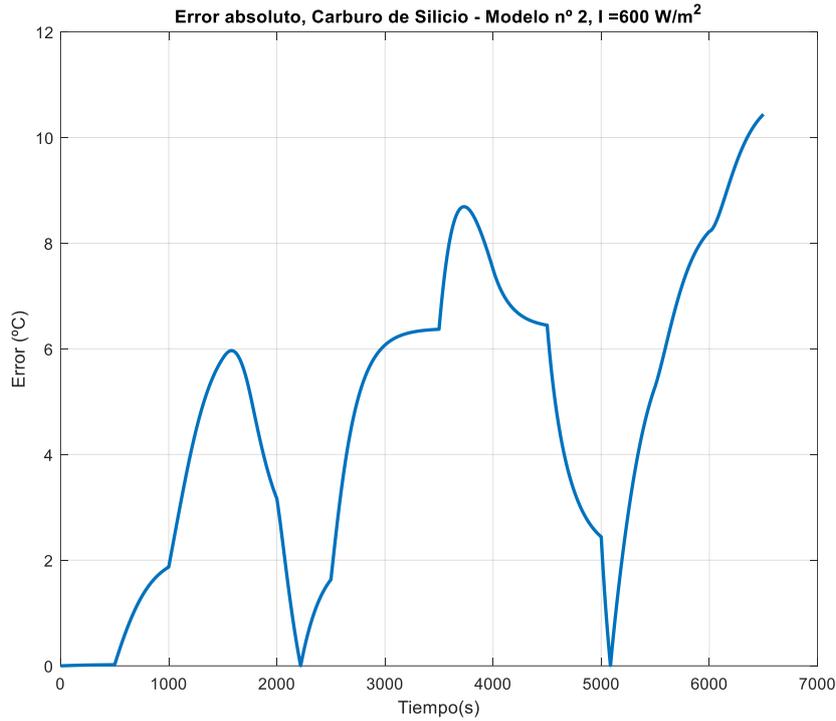


Figura 3.192. Error de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 600 W/m².

Seguidamente, se vuelve a aplicar la entrada descrita de apertura de persiana, pero para un valor de 700 W/m². El resultado, mostrado en la Figura 3.193, junto con el error de validación en la Figura 3.194, muestra que el modelo lineal se ajusta perfectamente para el rango dado y para el nivel de radiación de 700 W/m².

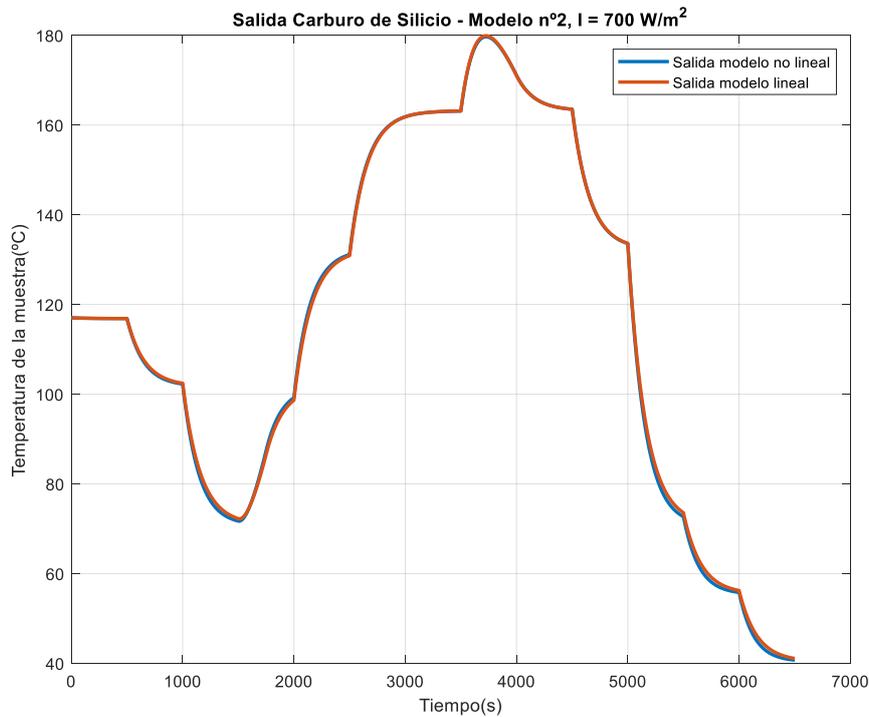


Figura 3.193. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 700 W/m².

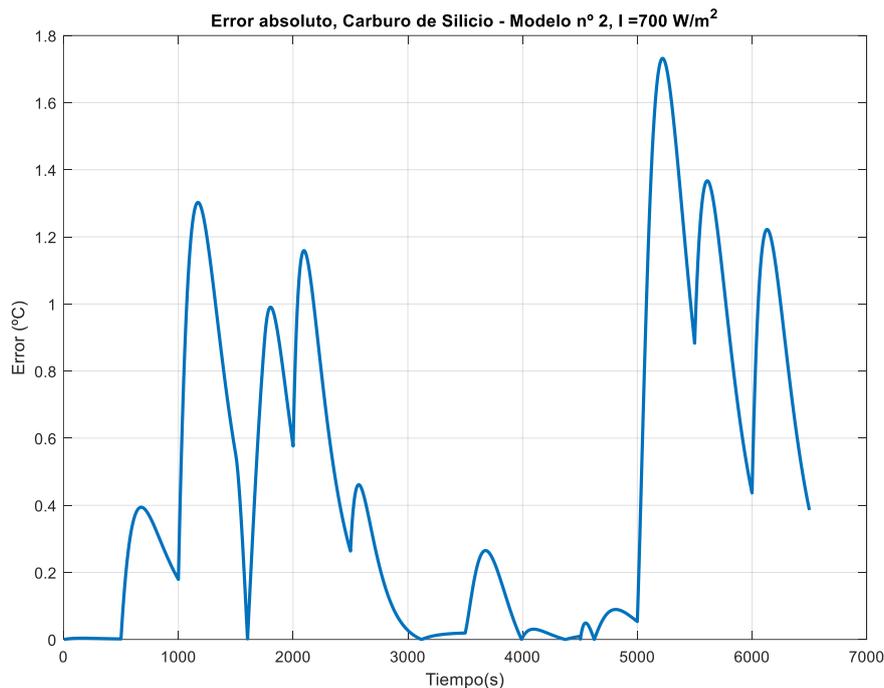


Figura 3.194. Error de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 700 W/m².

Finalmente, se muestran en la Tabla 70 los resultados de validación del modelo para los dos ensayos realizados a distintos valores de radiación, los cuales muestran resultados muy buenos. De hecho, el segundo ensayo para una radiación de 700 W/m² es casi perfecto (lo cual se divisa gráficamente con la Figura 3.193 y Figura 3.194) sino que también los índices lo muestran, ya que se obtiene un error medio y un valor de RMSE menor a 1 °C, y siendo el error absoluto máximo de 1.73 °C, lo cual son valores realmente bajos. Además, la primera validación con 600 W/m² también devuelve resultados muy buenos, pero el modelo lineal parece estar mejor ajustado al no lineal para un nivel de radiación mayor.

Tabla 70. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°2A respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 600 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 700 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	10.4402	1.7320
Error medio absoluto (°C)	4.6398	0.4781
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	5.4608	0.6783
R²	0.9766	0.9997

- Validación del modelo lineal n°2B, de 3 % al 7 % de apertura de persiana.

$$G_2(s) = \frac{61.375}{158.25s + 1}$$

Para el mismo modelo que el intervalo anterior, ahora se valida para un rango superior de apertura de la persiana de 3 % a 7 %, pero para todo el rango de operación completo. A continuación, se muestra en la Figura 3.195 la apertura de persiana introducida durante cada uno de los ensayos.

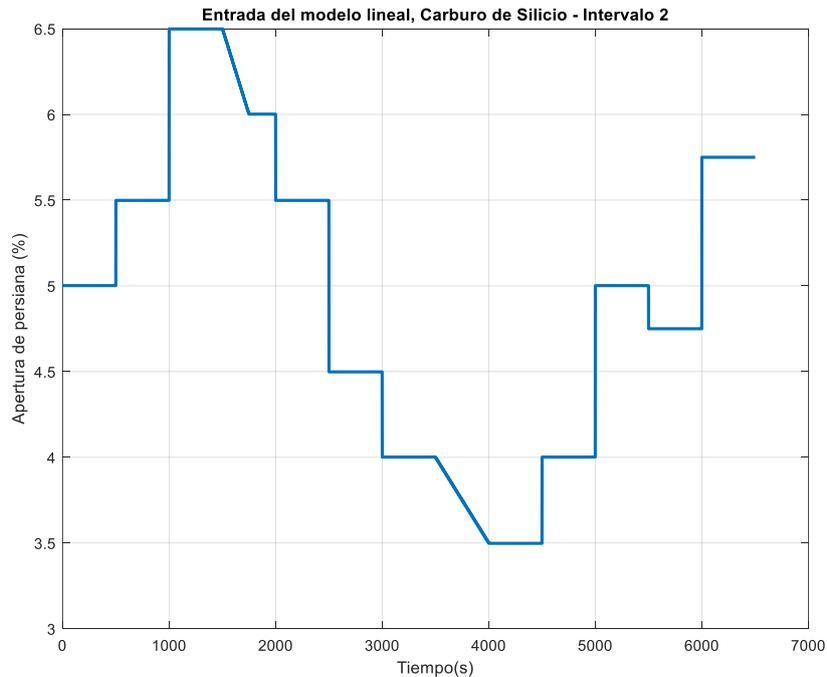


Figura 3.195. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°2B, muestra de carburo de silicio.

A continuación, se muestra en la Figura 3.196 y Figura 3.197 el resultado de introducir dicha apertura de persiana con un nivel de radiación de 650 W/m^2 , y se comprueba que el modelo lineal diseñado para este intervalo posee una ganancia superior que el modelo no lineal. Aun así se consideran resultados aceptables dado el nivel de error que no es demasiado alto.

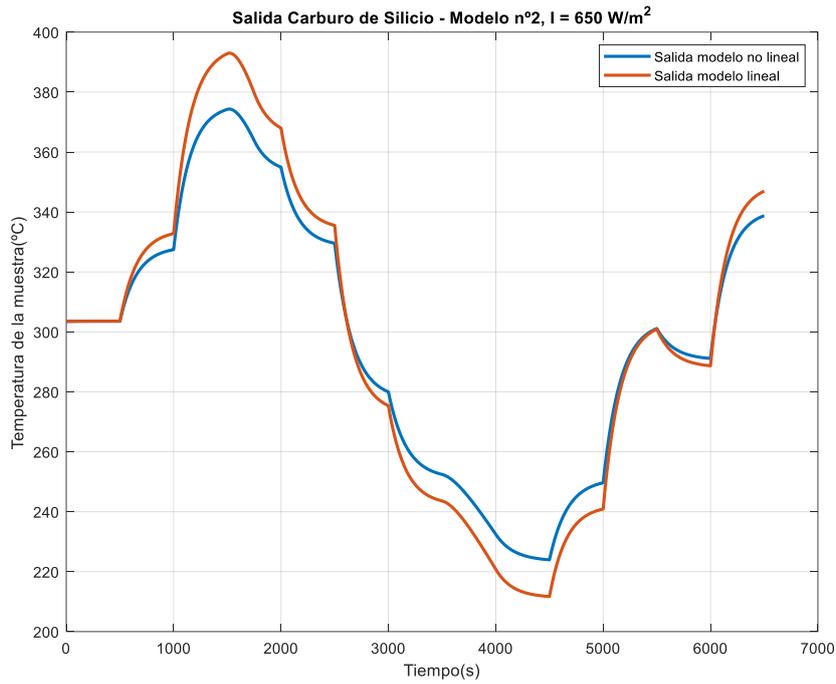


Figura 3.196. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m².

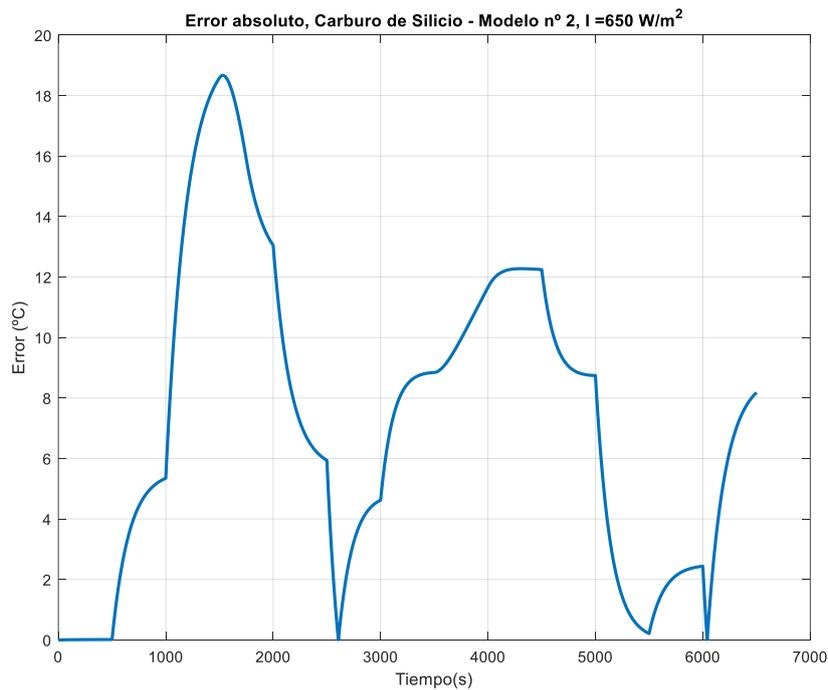


Figura 3.197. Error de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m².

Se prosigue validando el modelo lineal, pero esta vez para un nivel de radiación igual a 800 W/m², tal y como se muestra en los resultados de la Figura 3.198 y de la Figura 3.199, que muestra como la ganancia del modelo no lineal es mayor y se ajusta de mejor forma para apertura de persiana pequeñas del intervalo, mientras que para aperturas de persiana más cercanas al límite del 7 % la ganancia del modelo no lineal se queda “corta” respecto la del modelo lineal medio del intervalo.

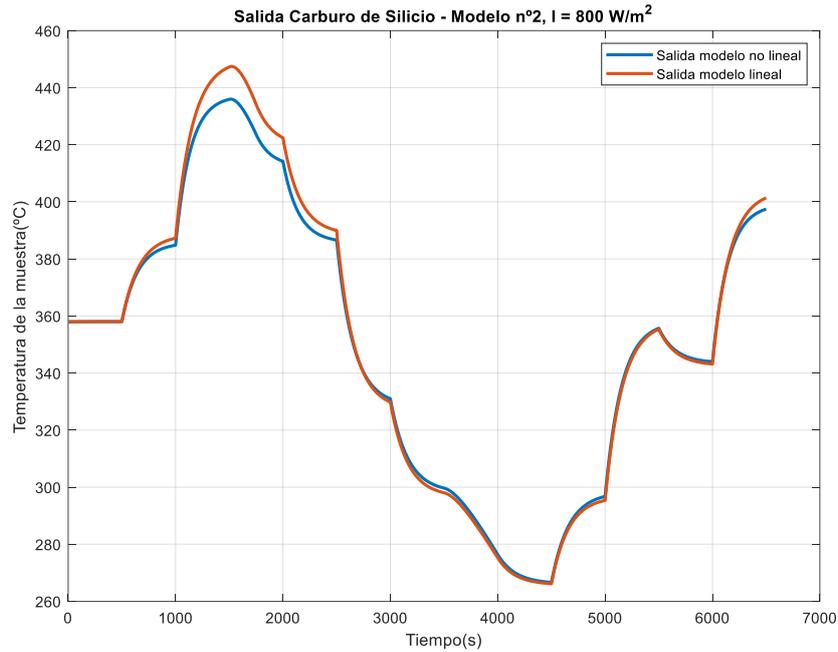


Figura 3.198. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m².

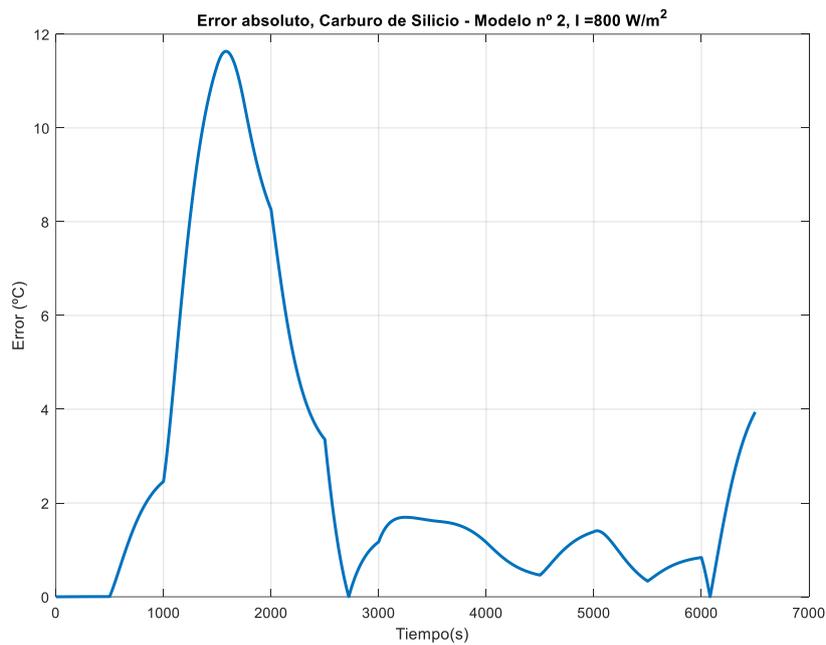


Figura 3.199. Error de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m².

Finalmente se termina de validar el modelo lineal n°2 con un nivel de radiación de 950 W/m², tal y como se muestra en la Figura 3.200 y Figura 3.201, donde al seguir aumentando el nivel de radiación, el modelo no lineal aumenta su ganancia y se ajusta mejor a la salida del modelo lineal medio calculado para el intervalo dado. En este ensayo, si se compara con el anterior, la salida del modelo no lineal posee una ganancia mejor ajustada (con menor valor de error) para apertura de persiana cercanas al límite superior del intervalo, pero en consecuencia aumenta el error en el rango de operación de apertura

de persiana más pequeñas donde ahora posee más ganancia el modelo no lineal que el lineal, empeorando respecto el ensayo anterior con menor nivel de radiación.

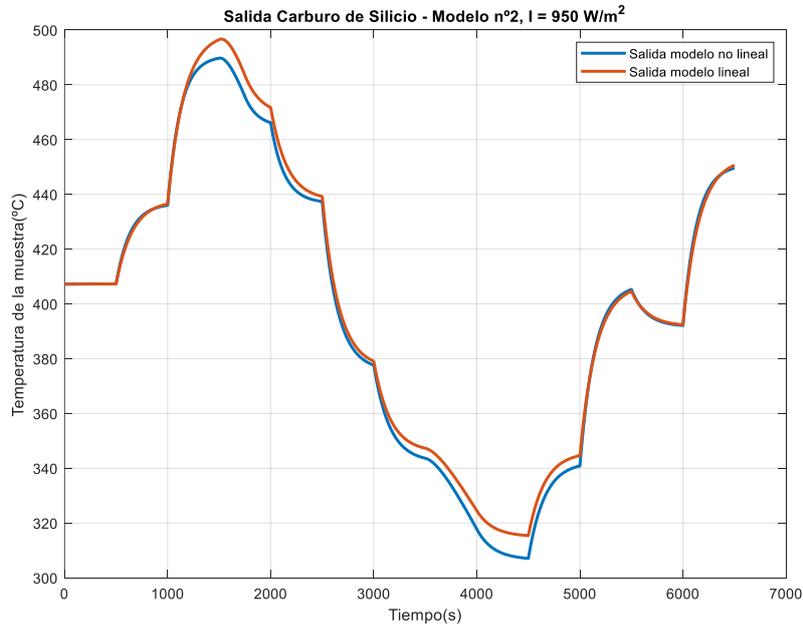


Figura 3.200. Validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

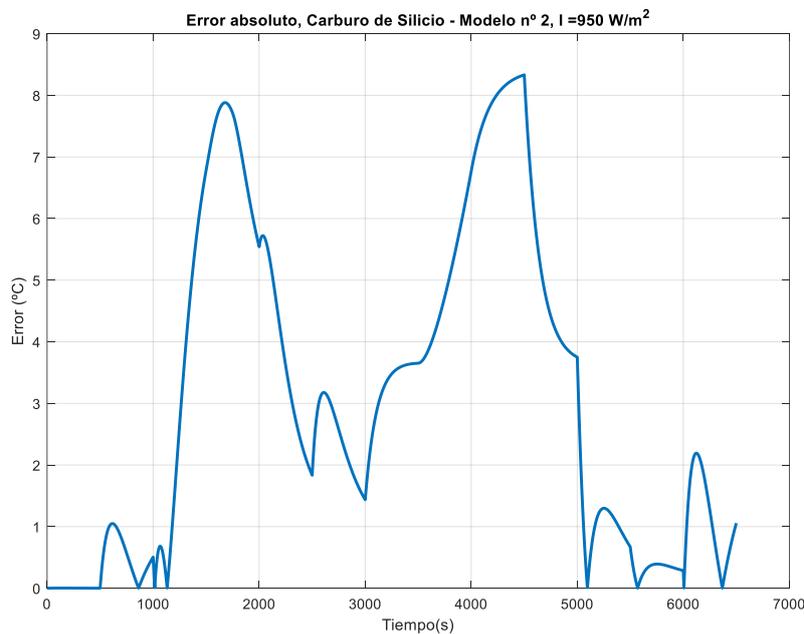


Figura 3.201. Error de validación, modelo lineal n°2 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

Finalmente, se muestra a continuación en la Tabla 71 la validación del modelo lineal n°2 para el segundo intervalo de apertura de la persiana establecido (modelo n°2B), donde se puede observar que el modelo lineal estaría bien ajustado teniendo en cuenta la no linealidad presente en el modelo general del horno. De hecho, el modelo lineal de este intervalo parece estar bien diseñado para este intervalo para niveles de radiación medios, siendo el peor de los escenarios cuando la radiación es baja, puesto que los propios índices

lo corroboran mostrando valores más altos de error medio absoluto, error absoluto máximo y RMSE y un valor más bajo de R^2 .

Tabla 71. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°2B respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	18.6685	11.6329	8.3323
Error medio absoluto (°C)	7.2912	2.6116	3.091
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	8.9199	4.1068	4.0573
R²	0.9586	0.9931	0.9942

- Validación del modelo lineal n°3, de 7 % al 15 % de apertura de persiana.

$$G_3(s) = \frac{38.625}{114.75s + 1}$$

En este intervalo de la apertura de la persiana, se utiliza como se puede observar un modelo con menor ganancia y menor constante de tiempo respecto de los anteriores, dada la no linealidad del modelo del horno. A continuación, se muestra la entrada introducida al modelo lineal y al no lineal, en la Figura 3.202:

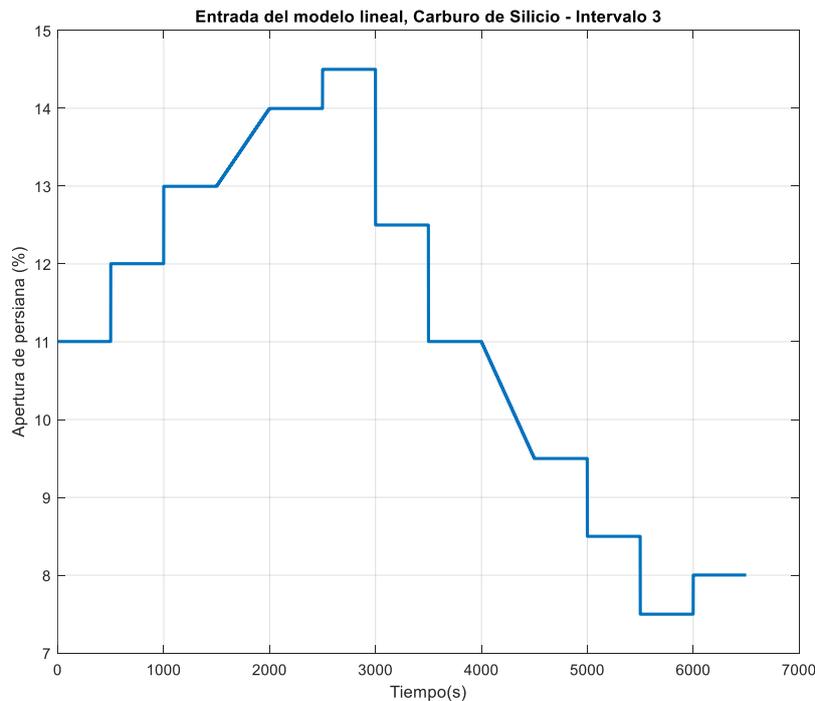


Figura 3.202. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°3, muestra de carburo de silicio.

Una vez establecida la entrada a los modelos, se muestra la validación del modelo lineal respecto del no lineal con un nivel de radiación de 650 W/m^2 en la Figura 3.203 y Figura 3.204, obteniéndose tal y como se puede observar mucho error entre el modelo lineal y el no lineal, dado que el modelo no lineal posee una ganancia pequeña comparada con el modelo lineal diseñado para este punto de operación de la radiación. Se observa que para el rango medio de operación el modelo lineal si ajusta bien, mientras que al acercarse a los límites del intervalo para el que se ha calculado aparece más error entre los modelos. Este error además se acentúa en valores de apertura de persiana mayores, donde la ganancia del modelo no lineal se hace más pequeña, mientras que el error es pequeño en apertura de persiana pequeñas, donde el modelo no lineal posee más ganancia y por tanto se acerca más a la impuesta al modelo lineal.

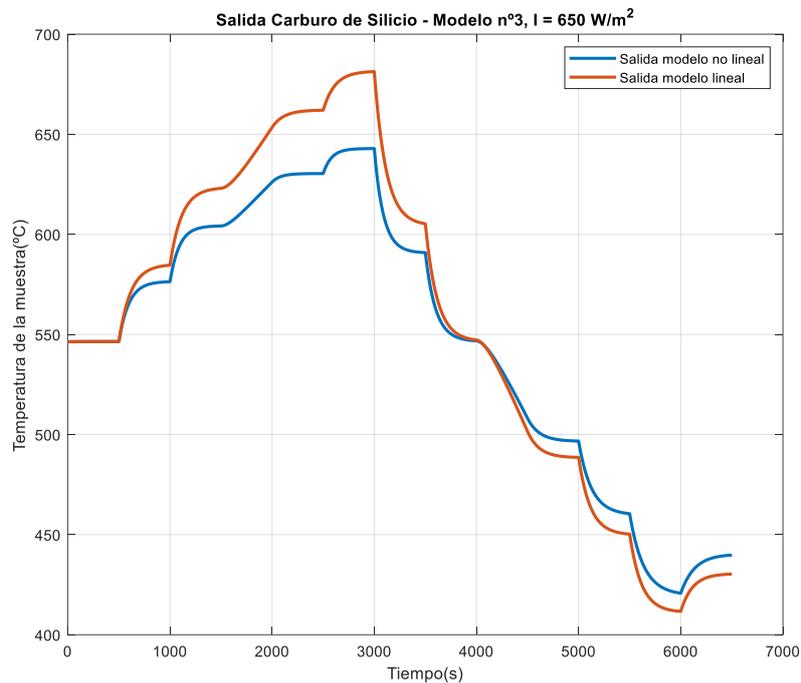


Figura 3.203. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m^2 .

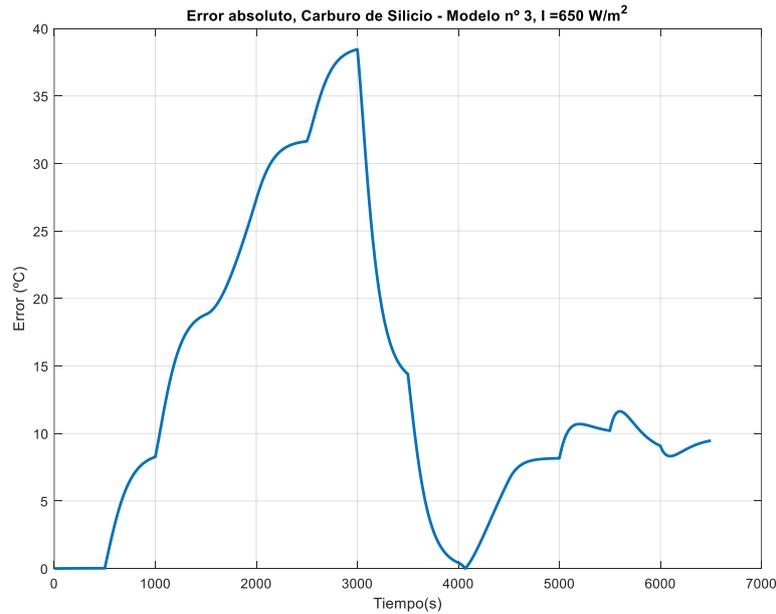


Figura 3.204. Error de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

Seguidamente se le introduce la misma entrada de apertura de la persiana, pero para un nivel de radiación igual a 800 W/m², cuyos resultados se muestran en la Figura 3.205 y Figura 3.206, donde la radiación empieza a verse cómo empieza a tener una menor influencia en la dinámica del modelo, tal y como demuestra la gráfica de error que permanece muy parecida, excepto en la parte más baja de apertura de persiana donde el error se reduce un poco. También aparecen ahora unos pequeños picos cuando se introducen las entradas, que son causa de incertidumbre en la constante de tiempo del modelo lineal diseñado.

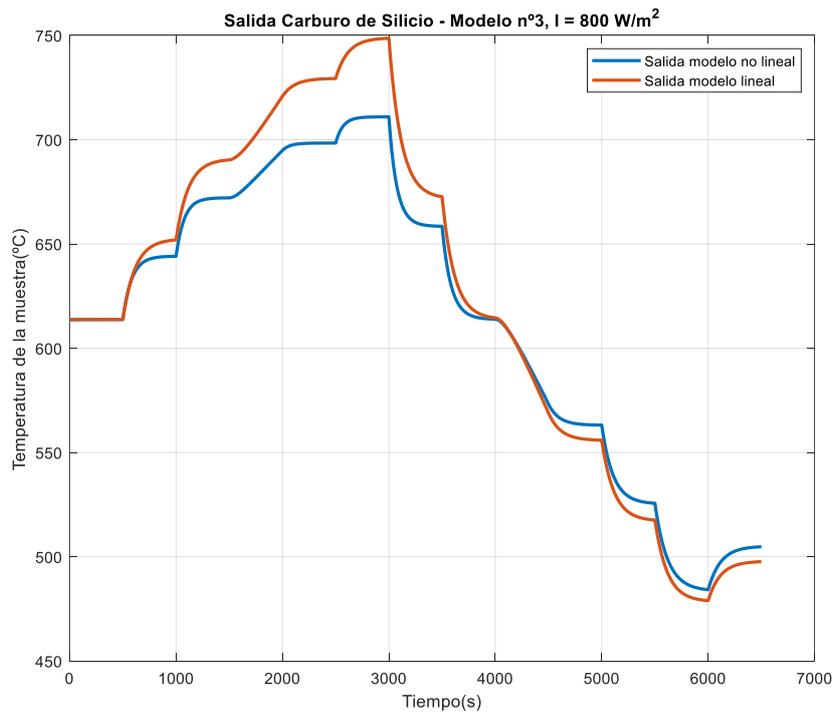


Figura 3.205. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m².

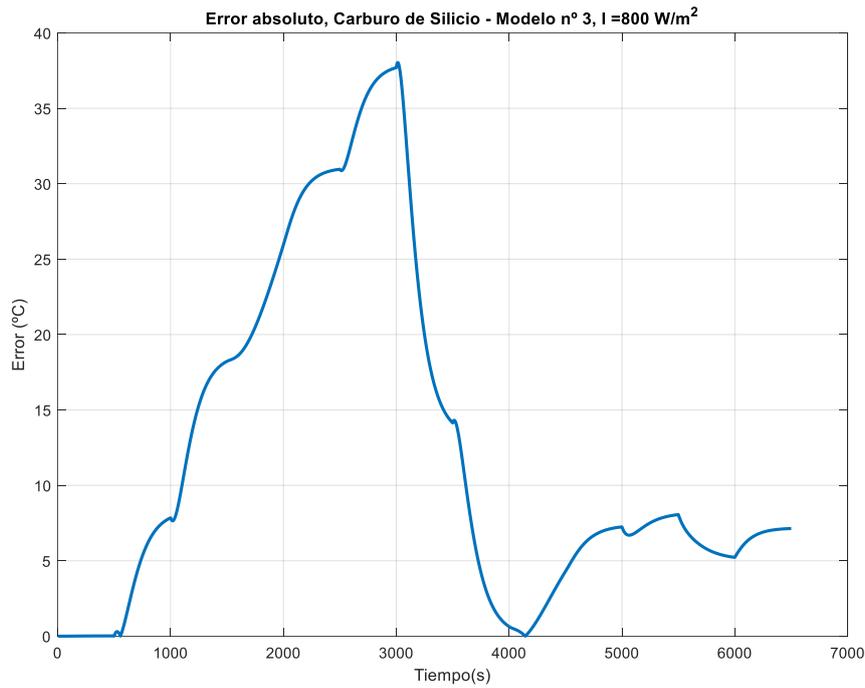


Figura 3.206. Error de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m².

Para finalizar, se simula para un nivel de radiación de 950 W/m², el último nivel intermedio de radiación del intervalo. Los resultados se muestran en la Figura 3.207 y Figura 3.208 donde se muestra que el aumentar la radiación se reduce el error en la parte de la simulación donde la apertura de la persiana es más pequeña, entre los 5000 y 6000 segundos, ya que esa parte del rango de operación, la ganancia está más influenciada por la radiación que por ejemplo la parte superior donde apenas se nota diferencia. Además la diferencia entre las constantes de tiempo crean esos pequeños picos de error dado que el modelo no lineal, que posee una constante de tiempo más pequeña que la calculada para el modelo lineal medio, reacciona con mayor rapidez que el modelo lineal que es más lento.

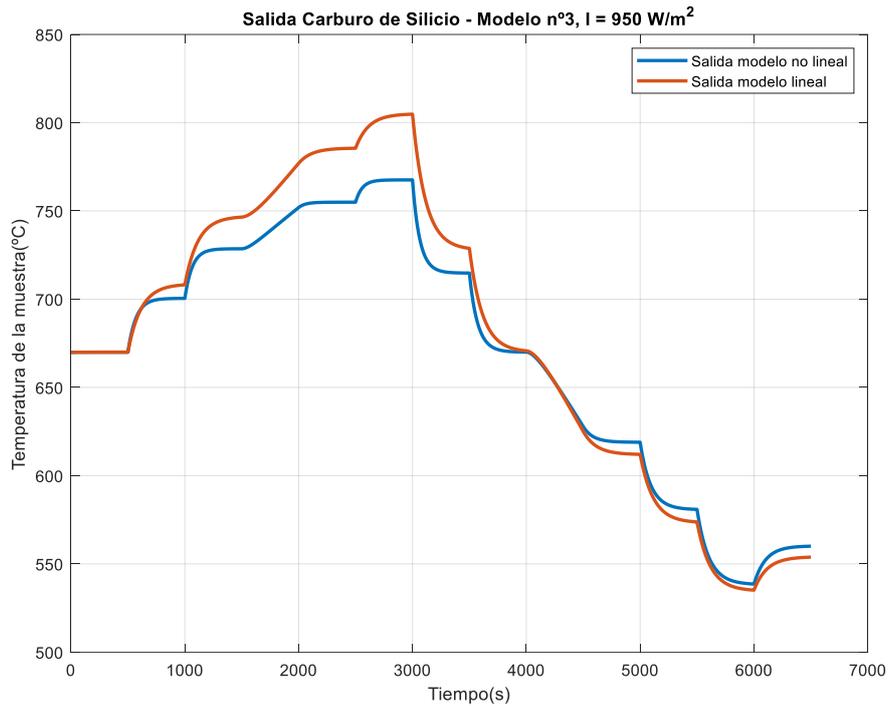


Figura 3.207. Validación, modelo lineal n°3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

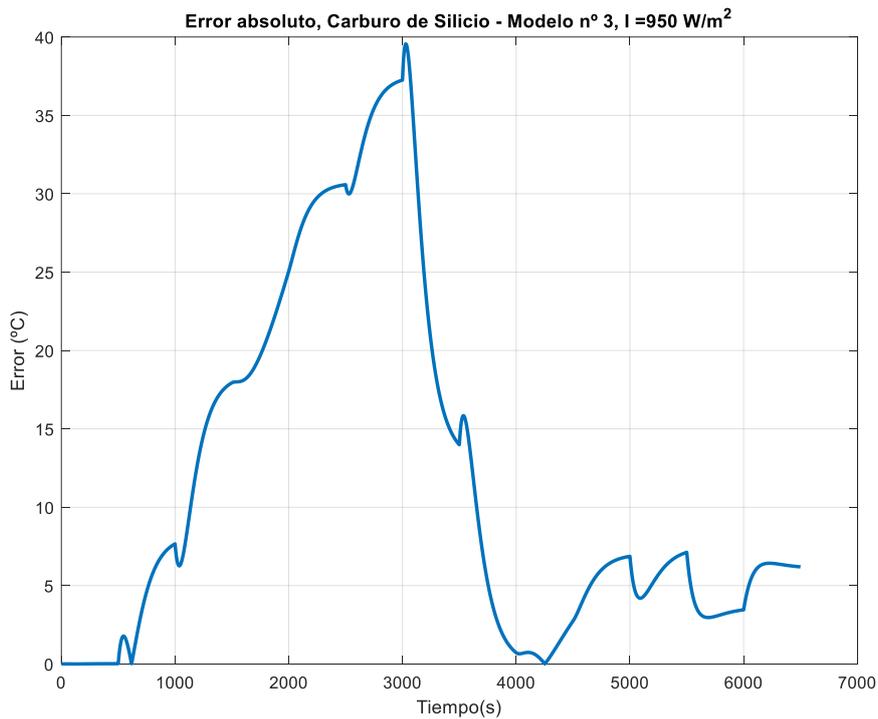


Figura 3.208. Error de validación, modelo lineal n°3 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

Por último, se muestran los valores obtenidos de los índices de funcionamiento para cada una de las simulaciones en la Tabla 72, donde se aprecia poca diferencia entre un ensayo y otro, destacando el último ensayo que posee menor error medio y RMSE que los demás, aunque la diferencia entre las constantes de tiempo provoca que exista mayor error máximo absoluto que en los otros ensayos.

Tabla 72. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°3 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	38.4521	38.0358	39.5574
Error medio absoluto (°C)	13.5730	12.3982	11.8259
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	17.4618	16.7164	16.4392
R²	0.9359	0.9438	0.9468

- Validación del modelo lineal n°4, de 15 % al 27 % de apertura de persiana.

$$G_4(s) = \frac{20.4375}{71.25s + 1}$$

Primeramente se define la entrada a los modelos partiendo del punto medio de apertura de persiana del intervalo de 21 %, que se introducirán para los distintos niveles de radiación como se ha ido haciendo hasta ahora. Así, se muestra en la Figura 3.209 esta señal de apertura de la persiana durante el tiempo de simulación.

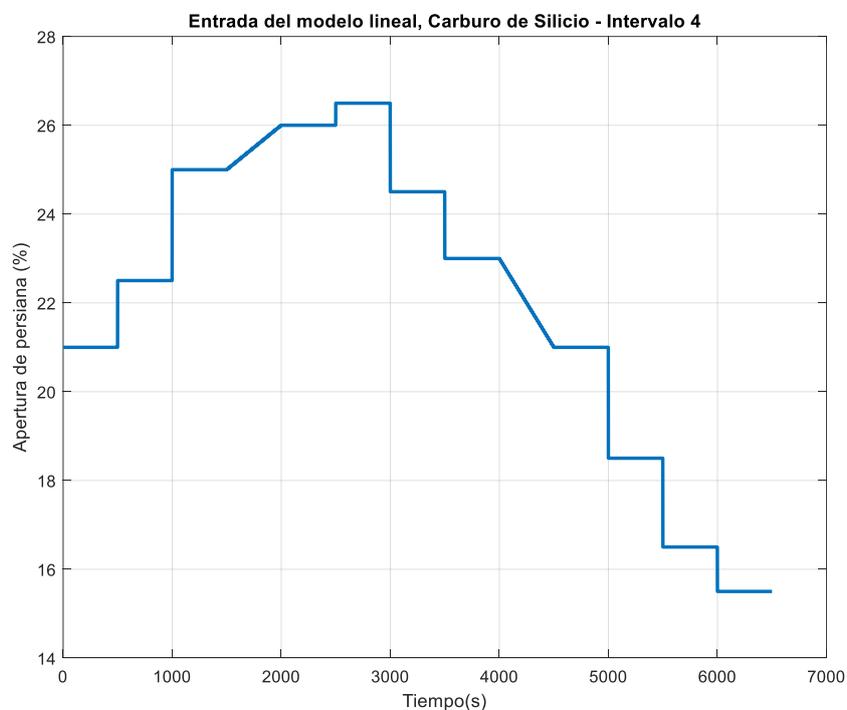


Figura 3.209. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°4, muestra de carburo de silicio.

Una vez definida la entrada de apertura de persiana, se obtienen las salidas de los modelos y el error absoluto entre las mismas en la Figura 3.210 y la Figura 3.211, donde se observa que el modelo lineal posee demasiada ganancia respecto del no lineal cuando se trabaja a aperturas de persiana grandes, mientras que a aperturas de persiana menores en el intervalo dado, el modelo no lineal adquiere ganancia y la salida entre los modelos se equipara, dando niveles de error bajos.

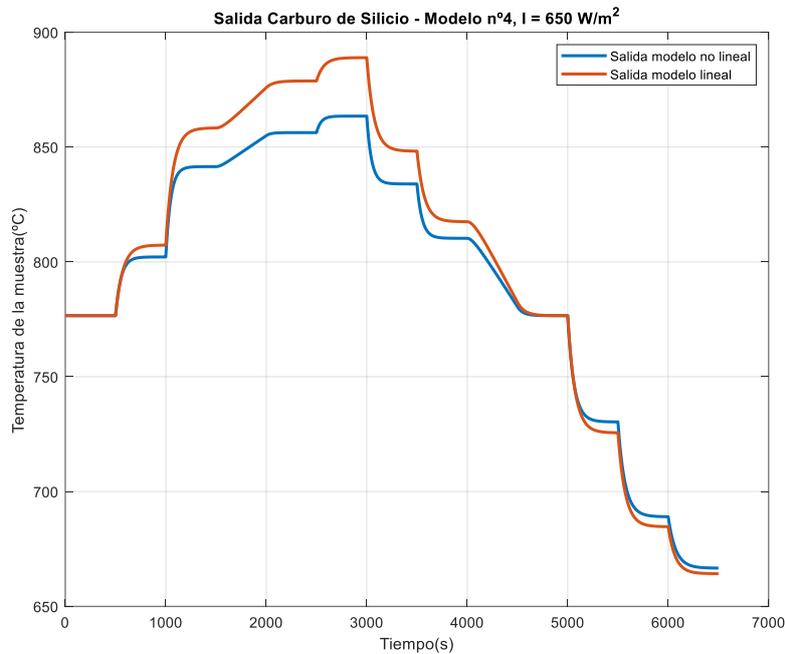


Figura 3.210. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m².

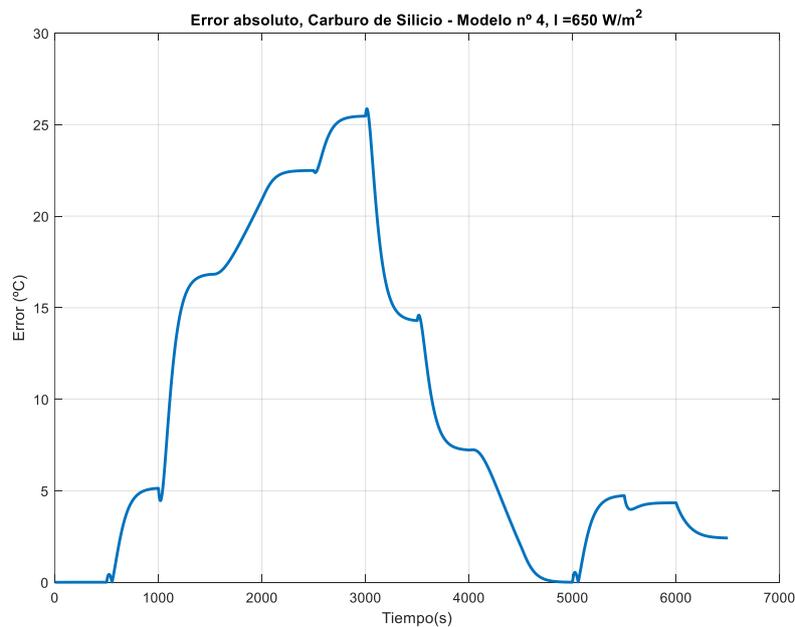


Figura 3.211. Error de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m².

Seguidamente se obtiene el resultado de aplicar un nivel de radiación igual a 800 W/m^2 en la Figura 3.212 y Figura 3.213, donde se evidencia que la radiación solar apenas influye entre un ensayo y otro en la ganancia pero si lo hace en la constante de tiempo, donde el modelo no lineal se hace más rápido y provoca ante los cambios en la entrada esos picos de error con el modelo lineal.

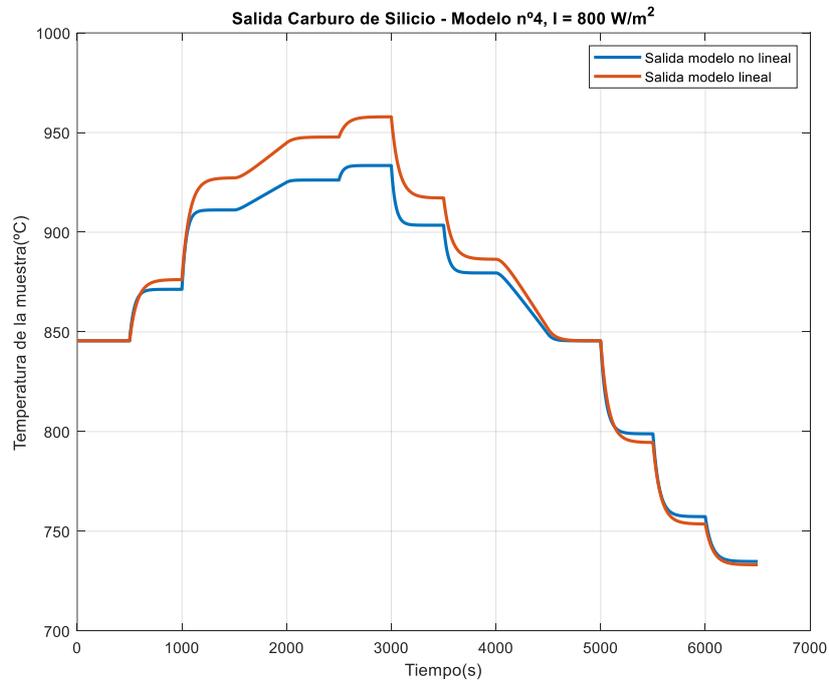


Figura 3.212. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m^2 .

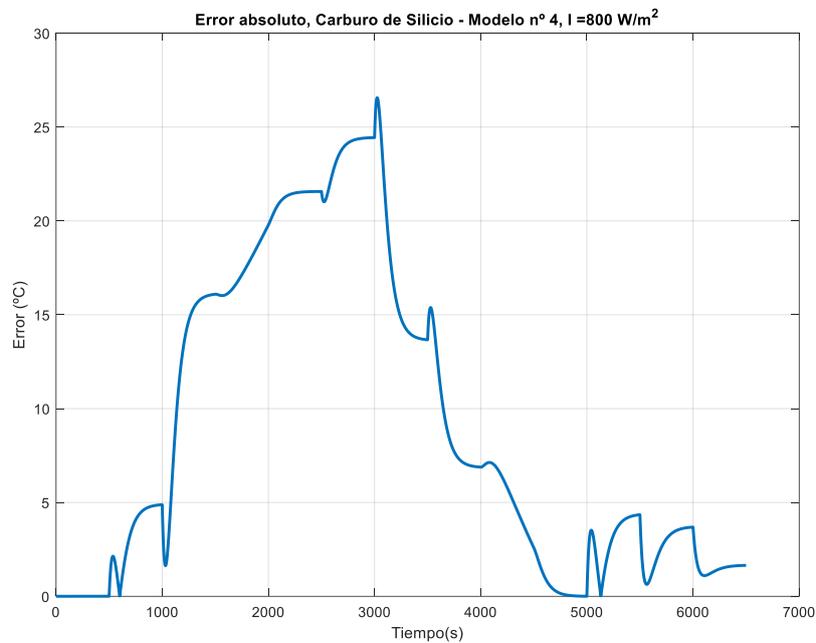


Figura 3.213. Error de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m^2 .

Se termina validando el modelo para este intervalo para un nivel de radiación igual a 950 W/m^2 , cuyo resultado se muestra en la Figura 3.214 y Figura 3.215 que demuestra que, como se ha venido diciendo, la radiación deja de influir tanto en la ganancia pero si hace para la constante de tiempo; aun así, se aprecia una pequeña reducción del error absoluto respecto de los anteriores ensayos, aunque esto se verá continuación al analizar los índices de funcionamiento del modelo lineal.

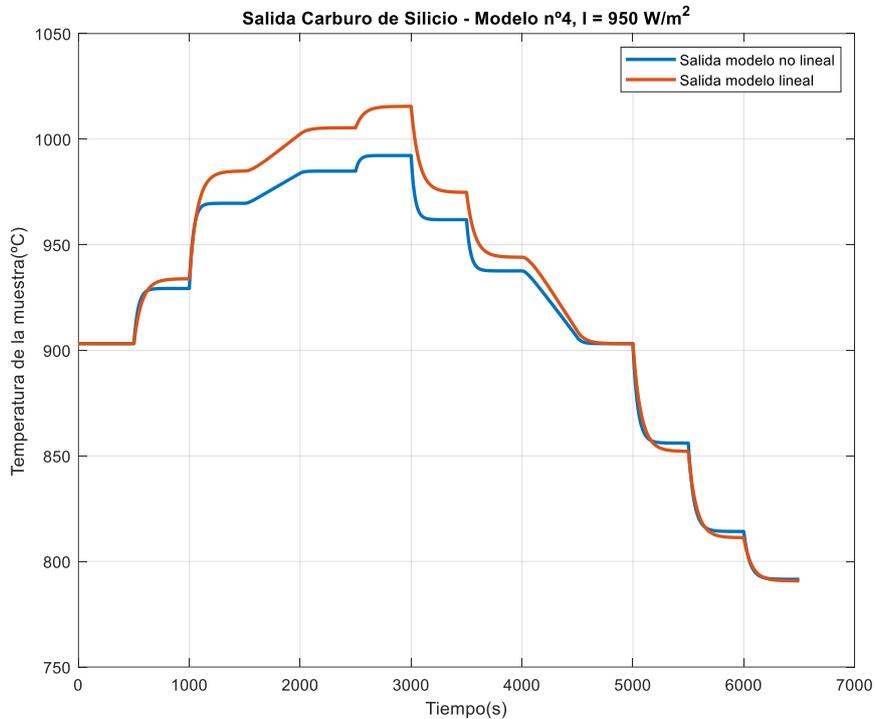


Figura 3.214. Validación, modelo lineal n°4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m^2 .

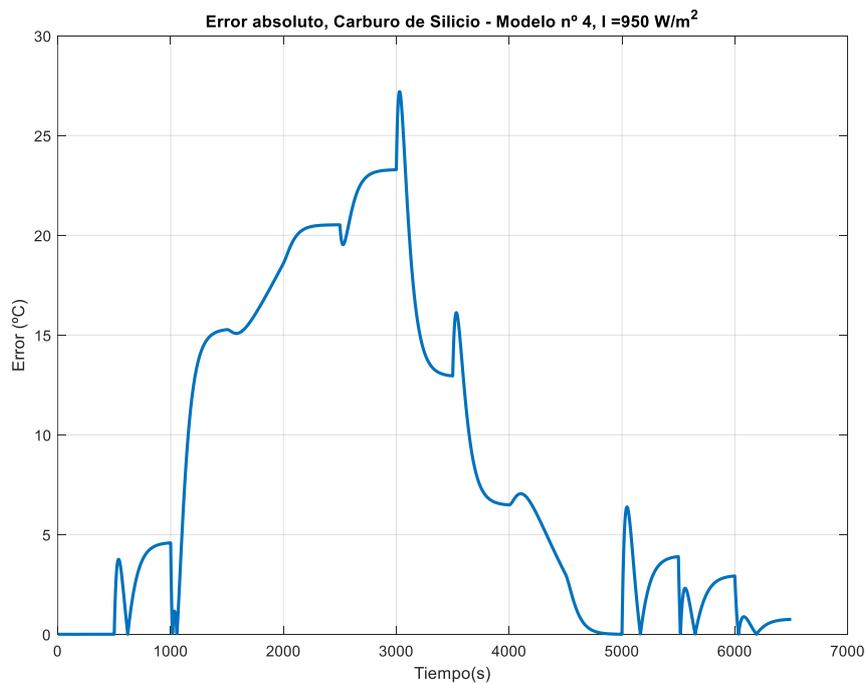


Figura 3.215. Error de validación, modelo lineal n°4 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m^2 .

Finalmente se recogen en la Tabla 73 los índices de funcionamiento del modelo lineal nº4 respecto del no lineal para este intervalo del rango de la operación, que muestran valores aceptables dadas la escala de temperaturas a la que se trabaja y la gran no linealidad de este modelo no lineal del horno. El valor de R2 es muy bueno en todos los casos, mayor al 95 %, y mejor en la última validación donde se ve que la radiación contribuye (mínimamente) a reducir en general el error medio del modelo lineal con el no lineal, aunque la diferencia entre la constante de tiempo de los modelos implica un aumento de los picos de error ante los cambios en la apertura de la persiana y que influyen en el indicador del error máximo absoluto.

Tabla 73. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº4 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	25.8668	26.5608	27.2033
Error medio absoluto (°C)	9.5853	9.0102	8.5310
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	12.7892	12.2497	11.6991
R²	0.9530	0.9581	0.9628

- Validación del modelo lineal nº5, de 27 % al 40 % de apertura de persiana.

$$G_5(s) = \frac{9.0625}{37.125s + 1}$$

Partiendo de un punto de operación definido por 33.50 % de apertura de persiana, se le introducirá al modelo lineal y al modelo no lineal la siguiente apertura de persiana durante el tiempo de simulación estipulado para ello. Esta entrada al modelo se grafica en la Figura 3.216.

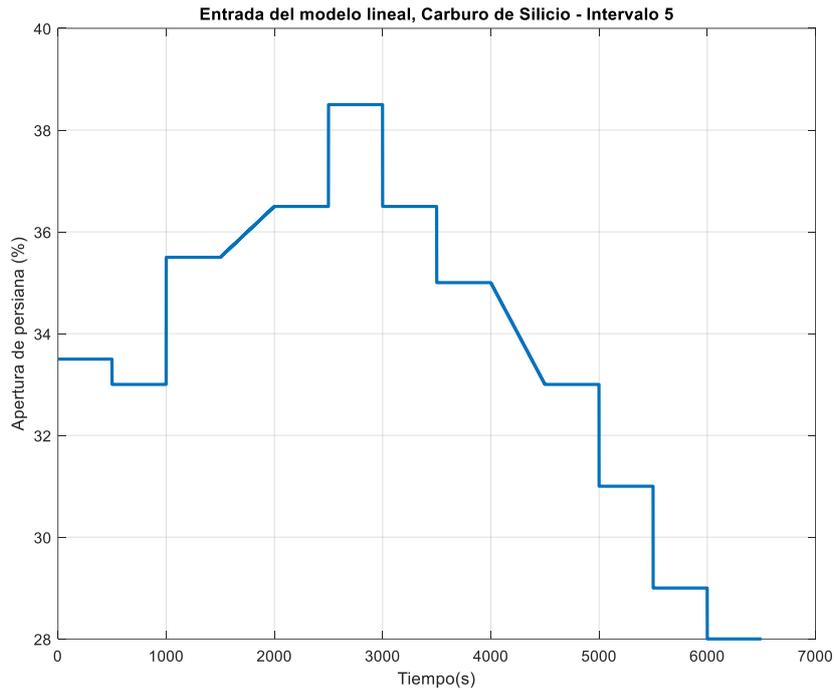


Figura 3.216. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°5, muestra de carburo de silicio.

Una vez definida la entrada que se le introduce a los modelos, se procede a simular el modelo lineal con un nivel de radiación igual a 650 W/m^2 . Estos resultados se muestran en la Figura 3.217 y en la Figura 3.218, que implican unos resultados bien ajustados para el centro del intervalo, pero desajustados para las zonas extremas del mismo, sobre todo para aperturas de persiana pequeñas. Sin embargo, dada la no linealidad del modelo, son resultados aceptables ya que además el error es de en torno a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, lo cual no es muy grande dado que se trabaja cerca de los $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura de la muestra de ensayo. Es notorio como el modelo no lineal posee más ganancia en todos los casos que el modelo lineal, puesto que normalmente venía sucediendo al contrario.

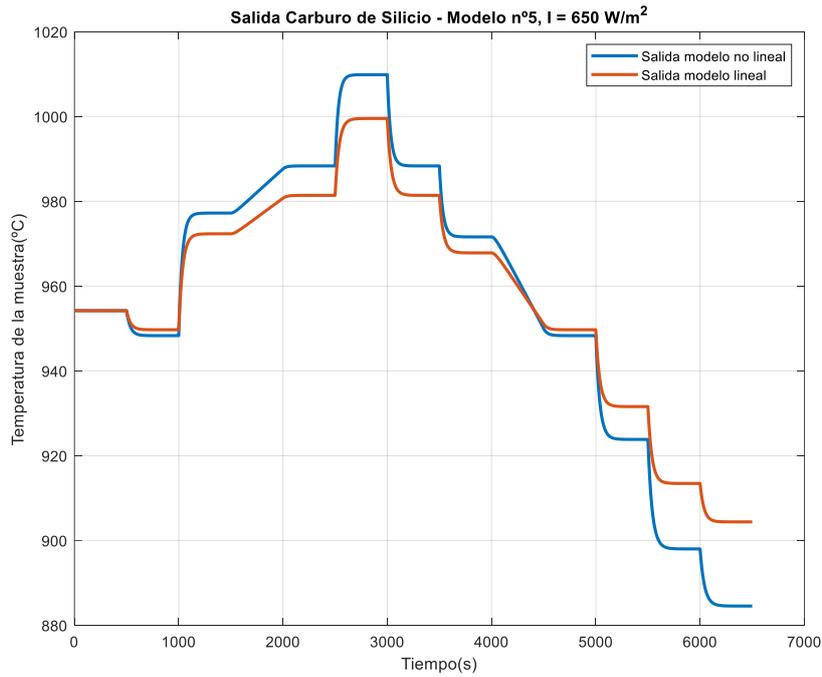


Figura 3.217. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m².

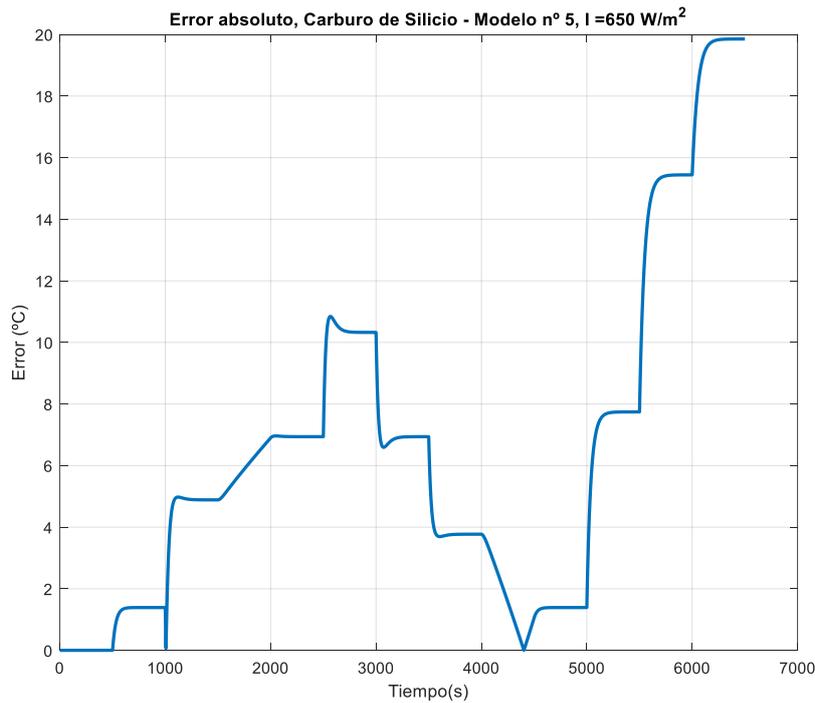


Figura 3.218. Error de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m².

Seguidamente se prueba con un nivel de radiación superior, de 800 W/m², cuyo resultado se muestra en la Figura 3.219, mientras que el error absoluto se grafica en la Figura 3.220 donde se aprecia respecto del ensayo anterior un ligero aumento del error en general (de 1 o 2 °C). Sin embargo, el efecto de trabajar a mayor o menor radiación es poco significativo para la diferencia de ganancias de los modelos, pero si lo es para las constantes de tiempo, donde se aprecia que los picos de error ante cambios en la entrada crecen dado que un sistema es ahora más rápido que el otro (el no lineal en todo caso, que a mayor radiación es más rápido, puesto que su constante de tiempo se reduce).

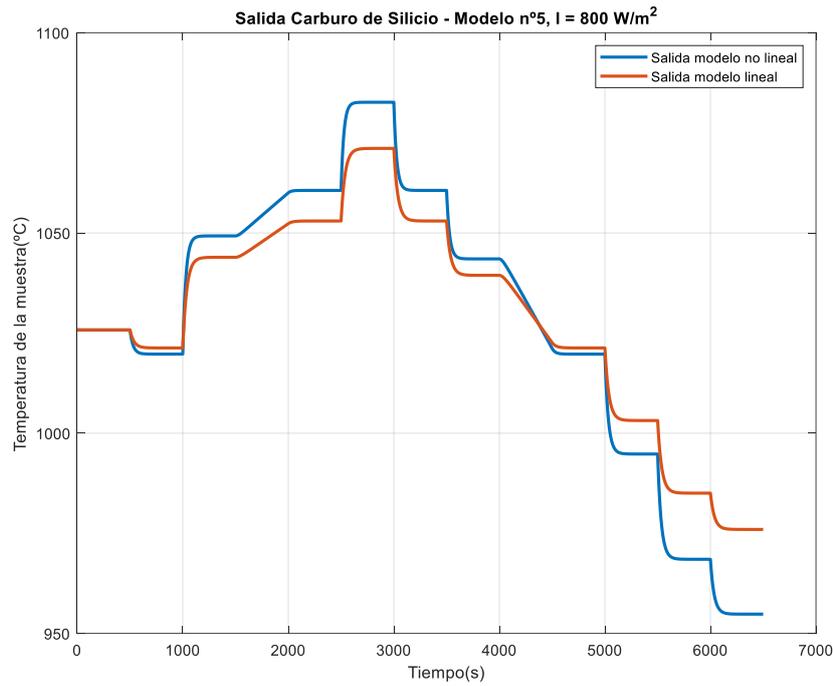


Figura 3.219. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m².

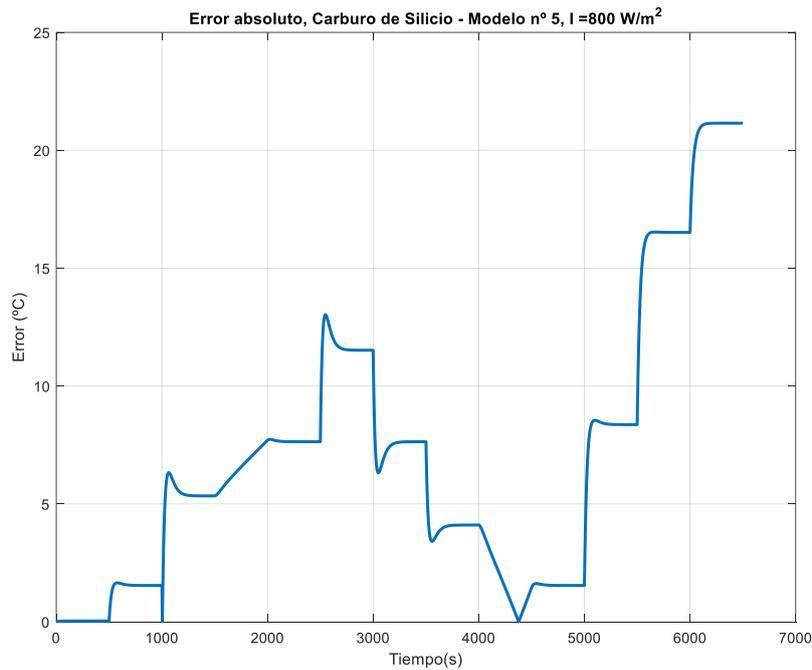


Figura 3.220. Error de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m².

Por último, se prueba con un nivel de radiación superior, de 950 W/m², cuyo resultado se muestra en la Figura 3.221 y Figura 3.222, que muestran poca diferencia respecto del nivel de radiación de 800 W/m², y que evidencia una vez más que la radiación influye poco la diferencia de ganancias entre modelo lineal y no lineal, si acaso incrementando la del modelo no lineal en las aperturas de persiana pequeñas donde el modelo no lineal está más afectado por la radiación en su dinámica que a altas aperturas de persiana.

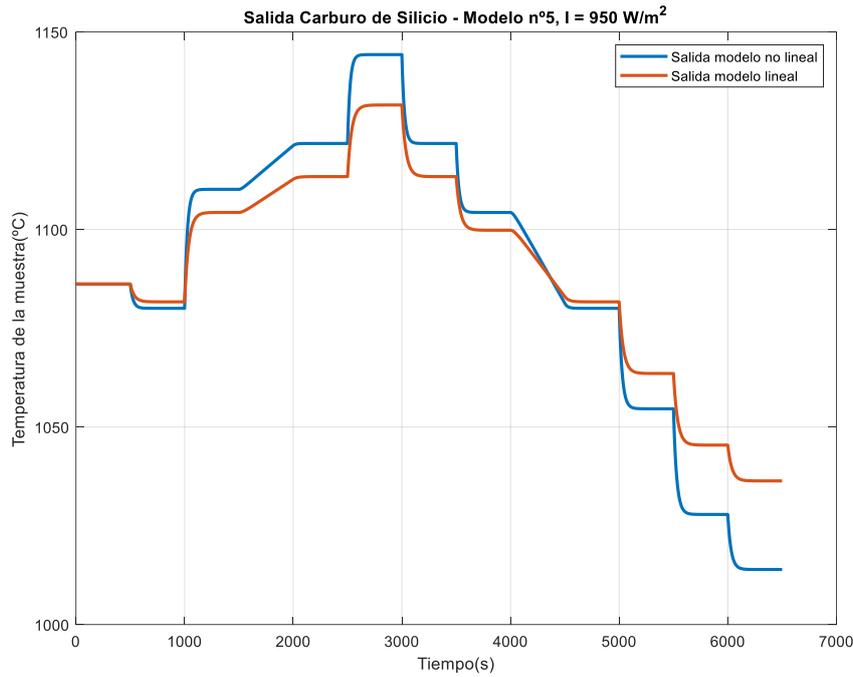


Figura 3.221. Validación, modelo lineal n°5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

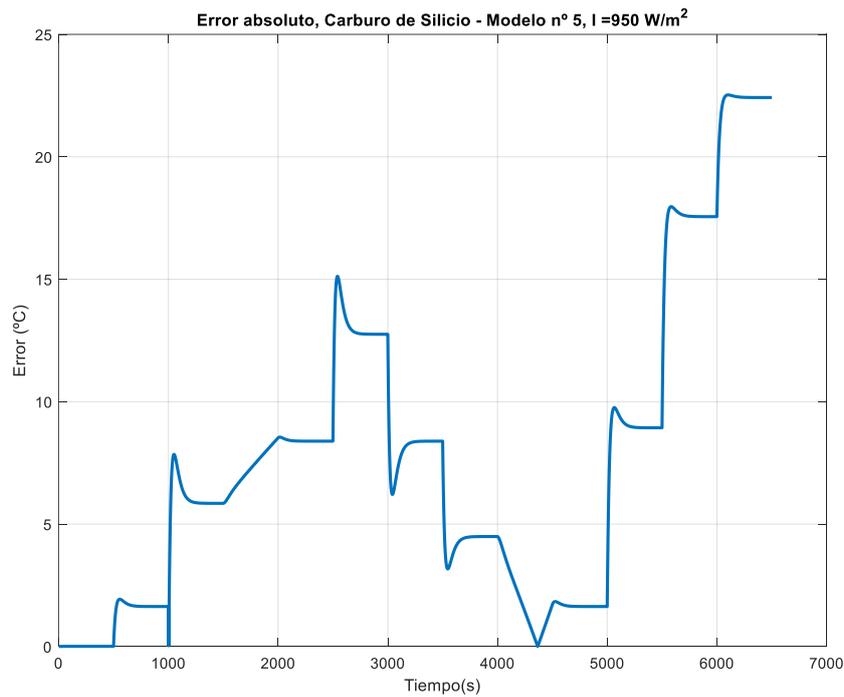


Figura 3.222. Error de validación, modelo lineal n°5 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

Finalmente se muestran en la Tabla 74 los índices de funcionamiento para los ensayos realizados, que muestran valores buenos de validación dado la no linealidad del modelo del horno. Se puede observar que el error medio no supera los 10 °C, ni el RMSE tampoco, lo cual indica que el ajuste es aceptable. Además, R^2 es superior al 93 % en todos los casos mientras que el error absoluto alcanza sus valores máximos, como se veía en las gráficas del error absoluto, cuando se trabaja en aperturas de persiana pequeñas (para el intervalo dado) donde el modelo no lineal posee mayor ganancia que el lineal, además de que la radiación influye más en la dinámica del modelo del horno cuanto menor es la

apertura de la persiana, por tanto la diferencia fundamental en los ensayos se da en ese rango de operación de abaja apertura de la persiana del intervalo dado. Dado que de partida (menor nivel de radiación) el modelo lineal poseía menor ganancia que el no lineal, es lógico que al aumentar el nivel de radiación los índices muestren un empeoramiento de la diferencia entre los modelos, puesto que la ganancia del modelo no lineal tiende a aumentar a mayor nivel de radiación, haciendo la diferencia aún mayor. Por lo tanto, se deduce que este modelo lineal para este rango de operación está mejor diseñado para radiaciones menores.

Tabla 74. Índices de funcionamiento del modelo lineal n°5 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	19.8519	21.1484	22.5271
Error medio absoluto (°C)	6.4962	7.1399	7.7659
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	8.4805	9.2648	10.0304
R²	0.9399	0.9315	0.9230

- Validación del modelo lineal n°6, de 40 % al 100 % de apertura de persiana.

$$G_6(s) = \frac{9.0625}{15.375s + 1}$$

Finalmente, se trabaja con el último modelo para el último rango de operación estimado, de un 40 % a un 100 % de apertura de la persiana, para lo cual se ha definido previamente la apertura de la persiana que se introducirá a ambos modelos partiendo de un punto de operación de un 70 %.

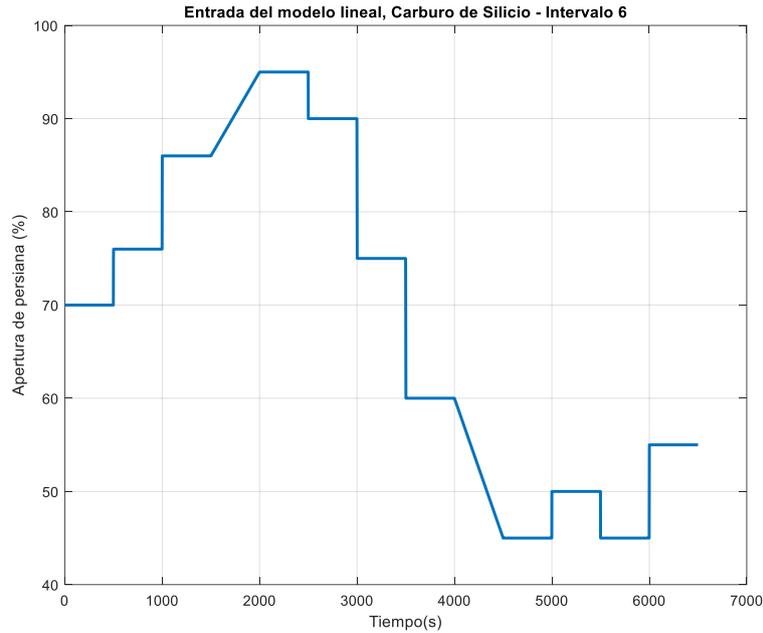


Figura 3.223. Apertura de la persiana que se introduce al modelo lineal y no lineal para validar el modelo lineal n°6, muestra de carburo de silicio.

Para la apertura de persiana definida y con un nivel de radiación de 650 W/m^2 , se obtienen los resultados mostrados en la Figura 3.224 y Figura 3.225, donde se aprecia que el modelo lineal posee mayor ganancia en general que el modelo no lineal, siendo la diferencia para aperturas de persiana mayores bastante grande, del orden de los casi $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Sin embargo, dado el rango de operación que se intenta abarcar, el resultado es previsible ya que además las propias unidades de la ganancia ($^\circ\text{C}/\%$) indican que cuanto mayor sea la amplitud del escalón o rampa, proporcionalmente lo será en términos de temperatura, y en este rango de operación tan amplio se introducen entradas de amplitud grandes. Por tanto, pequeñas diferencias de ganancia crean grandes errores puesto que las amplitudes de las entradas son muy grandes. Por último, nótese que el modelo no lineal funciona mejor a baja apertura de persiana donde posee más ganancia y por tanto se ajusta más a la ganancia del modelo lineal medio del intervalo; sin embargo, ante aperturas de persiana grandes, la ganancia del modelo no lineal se hace más pequeña y el error entre las señales aumenta en consecuencia.

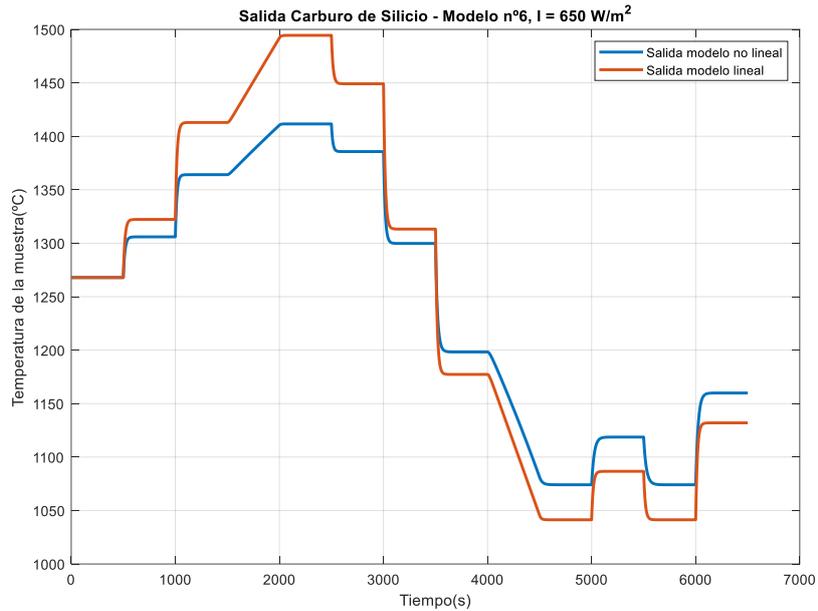


Figura 3.224. Validación, modelo lineal n°6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m².

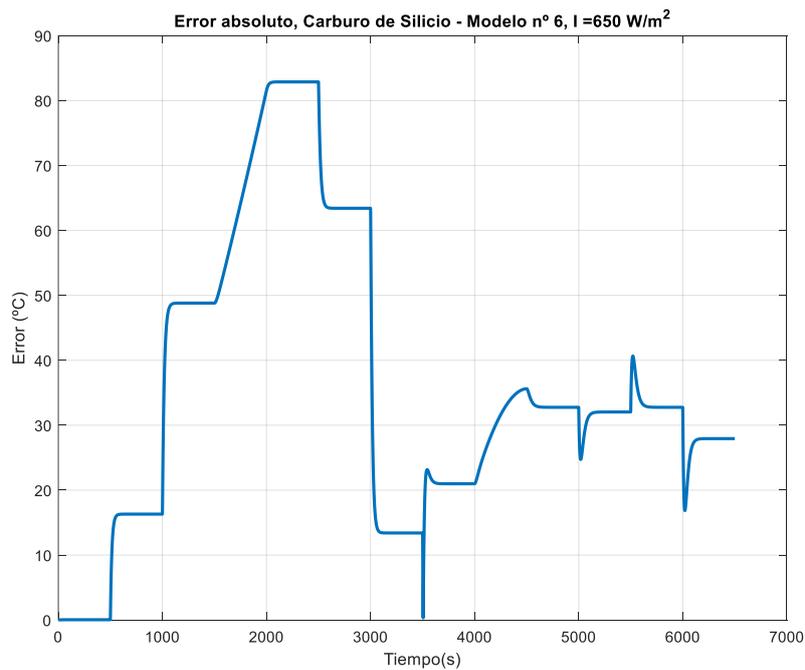


Figura 3.225. Error de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 650 W/m².

Los siguientes resultados que se muestran en la Figura 3.226 y Figura 3.227 son para un nivel de radiación igual a 800 W/m², donde se aprecia que la ganancia del modelo no lineal aumenta ligeramente disminuyendo el error; sin embargo, en este intervalo la influencia de la radiación es la dinámica del modelo no lineal es muy pequeña.

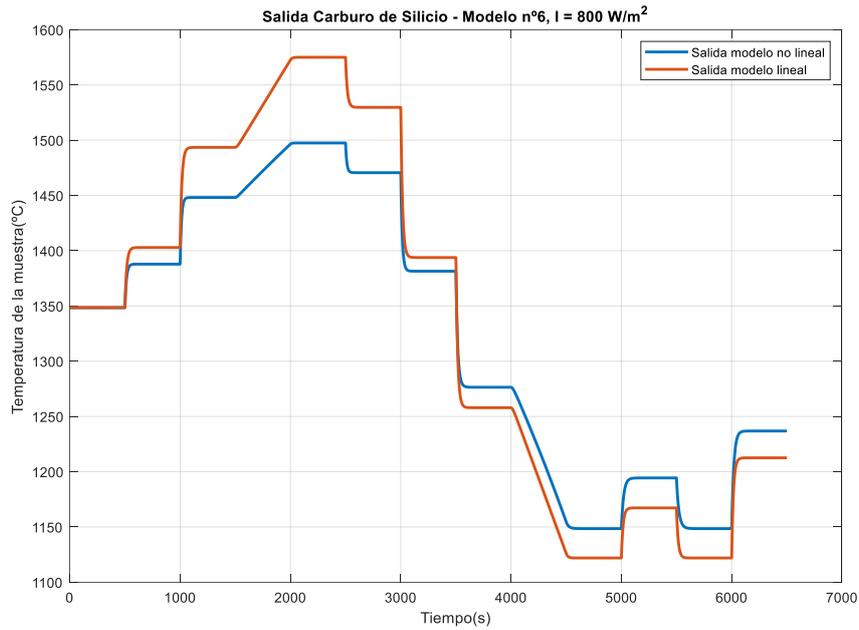


Figura 3.226. Validación, modelo lineal n°6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m².

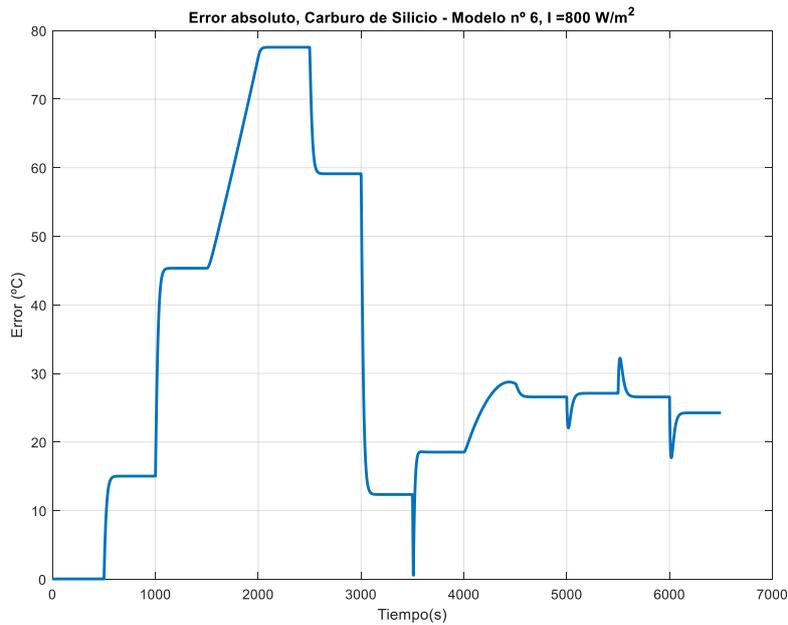


Figura 3.227. Error de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 800 W/m².

Por último, se valida el modelo lineal para un nivel de radiación de 950 W/m², cuyos resultados se muestran en la Figura 3.228 y Figura 3.229, donde se sacan las mismas conclusiones que para el anterior ensayo, y es que hay muy poca diferencia de trabajar a un nivel de radiación u otro en este rango de operación definido por la apertura de la persiana.

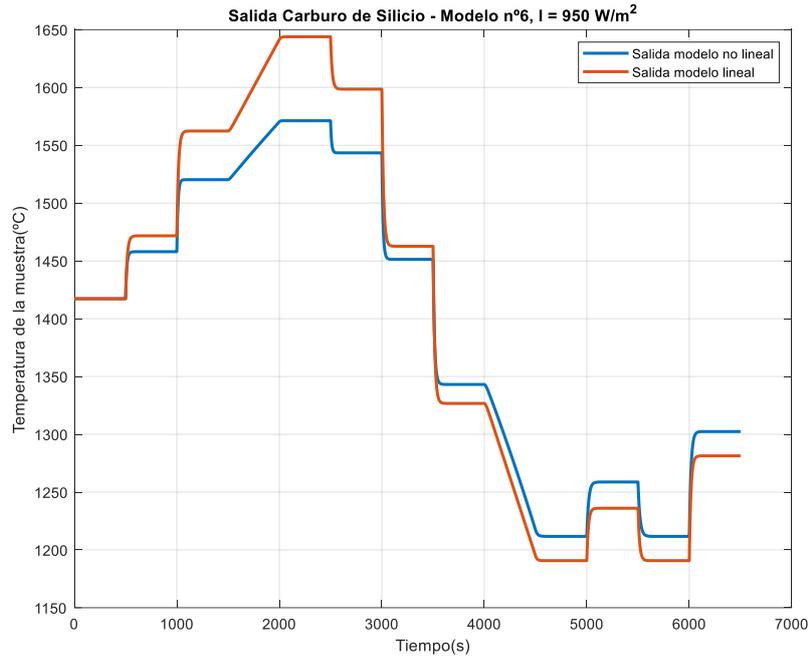


Figura 3.228. Error de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

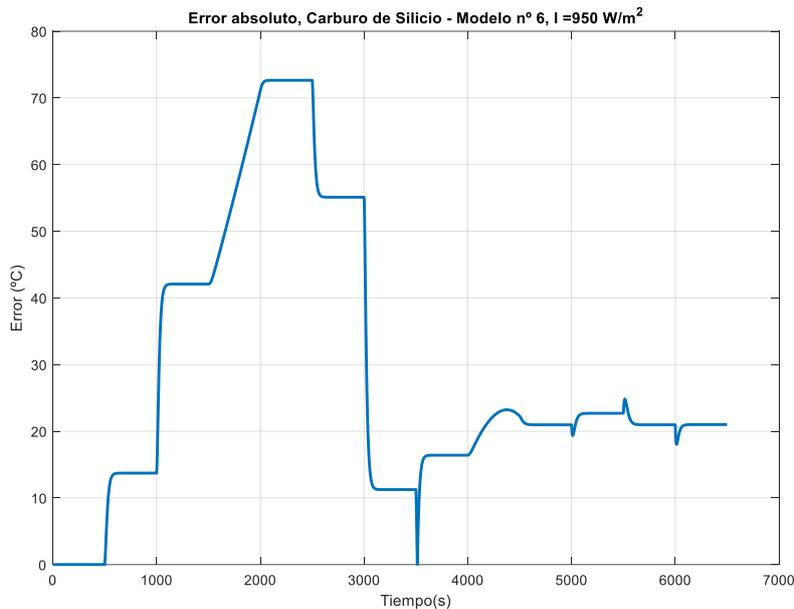


Figura 3.229. Error de validación, modelo lineal n°6 de la muestra de carburo de silicio, radiación 950 W/m².

Finalmente, se muestra en la Tabla 75 los índices de funcionamiento para el sexto modelo del rango de operación para la muestra de carburo de silicio, en los cuales se aprecia que los resultados de este modelo lineal no son muy precisos, ya que los valores de los índices dan valores algo altos. Esto es lógico dado el rango de operación que se pretende abarcar (del 40 % al 100 % de la apertura de la persiana). Aun así, pese a que era poco apreciable gráficamente, los índices de funcionamiento muestran una pequeña mejoría de una simulación a otra cuando se aumenta el nivel de radiación, disminuyendo errores medios, máximos y el RMSE, y aumentando el valor de R².

Tabla 75. Índices de funcionamiento del modelo lineal nº6 respecto del modelo no lineal, para la muestra de carburo de silicio en los distintos ensayos de validación.

	Ensayo 1 para radiación de 650 W/m²	Ensayo 2 para radiación de 800 W/m²	Ensayo 1 para radiación de 950 W/m²
Error máximo absoluto (°C)	82.8721	77.5657	72.6465
Error medio absoluto (°C)	35.8349	32.1171	28.7343
RMSE (raíz del error cuadrático medio) (°C)	42.3700	38.6256	35.2907
R²	0.8739	0.9021	0.9230

Como conclusión tras este último intervalo, se puede decir que para conseguir un modelo más preciso para este rango de operación se tendría que haber aumentado el número de intervalos, obtener más modelos lineales y realizar las correspondientes validaciones. En el caso de este trabajo, por el hecho de simplificar, se ha decidido realizar de esta forma la división ya que el error obtenido se considera aceptable.

3.2.5 Comparación de modelos de las distintas muestras

En este apartado simplemente se pondrá en comparativa los modelos lineales que se han obtenido en el apartado anterior, para tener una idea de que muestra posee una dinámica más rápida o con una mayor ganancia y viceversa. Para ello, se han graficado por un lado las constantes de tiempo y por otro las ganancias de los modelos lineales para el punto medio de cada intervalo de cada muestra, recogido en sus respectivas tablas al comienzo de cada validación, ajustando los puntos con una curva polinómica.

Aquellos intervalos que poseían ganancias o constantes de tiempo distintas en función de la radiación, se ha realizado la media entre las dos ganancias o constantes de tiempo. A continuación, se muestra la Figura 3.230 con las ganancias para cada muestra en función de la apertura de la persiana. Se extrae de observar dicha gráfica que la muestra de acero es la que mayor ganancia posee para rangos de apertura de la persiana pequeños, mientras que conforme aumenta la apertura de la persiana, es la zirconia blanca la que posee mayor ganancia de todas las muestras. Por otra parte, podría decirse que la que posee una ganancia más baja es el carburo de silicio.

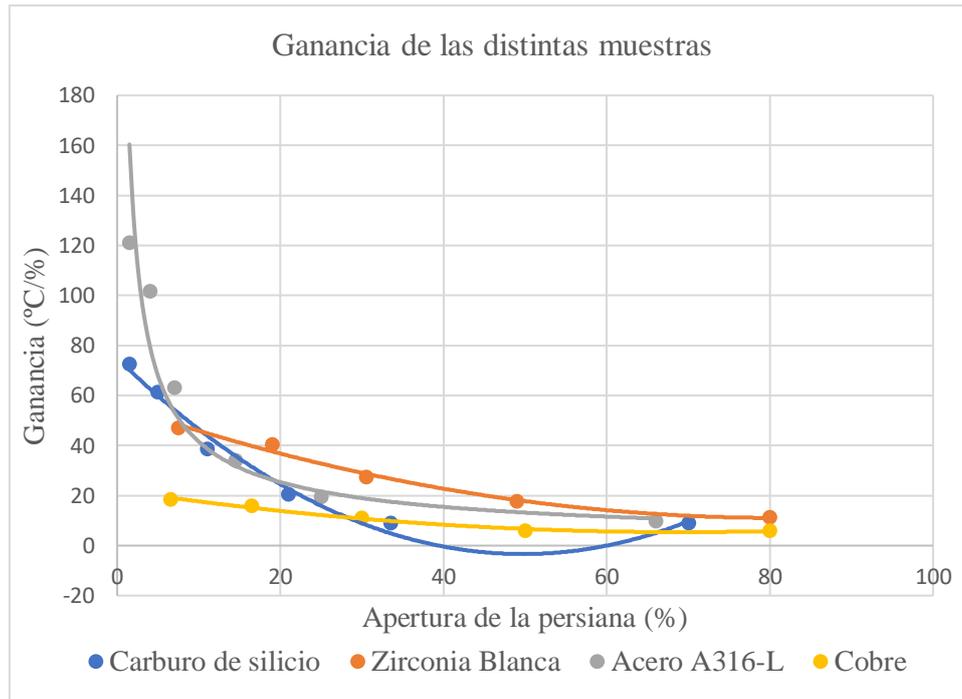


Figura 3.230. Ganancia de los modelos lineales de las distintas muestras.

A continuación, se muestran las constantes de tiempo en función de la apertura de la persiana en la Figura 3.231, donde se aprecia que el sistema más lento es el de cobre, además de que su constante de tiempo es muy variable respecto del punto de operación. Además, la constante de tiempo más pequeña es la correspondiente a la zircona blanca, siendo la del carburo de silicio y la del acero A316-L algo superiores.

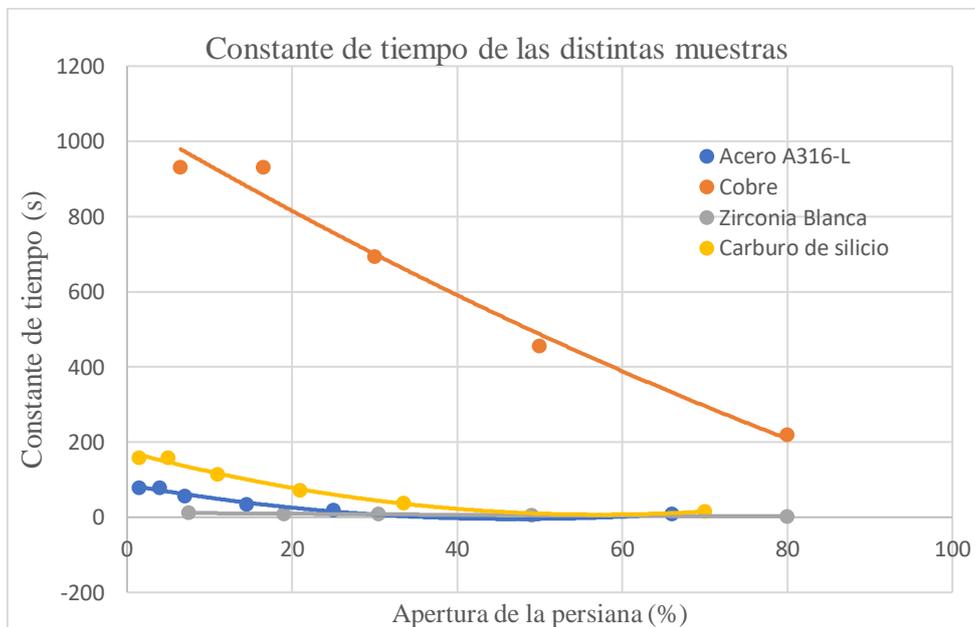


Figura 3.231. Constante de tiempo de los modelos lineales.

Por tanto, como conclusión se obtiene que el modelo de zirconia blanca representa un caso extremo de lo estudiado en este TFM, puesto que posee la constante de tiempo más pequeña y una de las ganancias más altas (el acero tiene más ganancia solo a aperturas de persiana pequeñas). Por otra parte, el sistema más lento con diferencia es el cobre,

mientras que posee la ganancia más pequeña, resultando ser el otro extremo de la comparativa, siendo el carburo de silicio y el acero A316-L muestras con dinámicas intermedias a las dos anteriores.

Se concluye que, tal y como se acaba de demostrar, la dinámica que se da en el horno solar depende en mucha medida del tipo de muestra y de sus características físicas y energéticas.

3.3 Resultados de diseño de control anticipativo

En esta parte del capítulo de resultados, se diseñarán los controladores por adelanto o *feedforward*, basados en la siguiente expresión (la cual luego se añade con signo negativo a la señal de salida del control por realimentación, ver diagrama de la Figura 2.9) tal y como se explicó en el capítulo de Materiales y Métodos:

$$FF(s) = \frac{G_D(s)}{G(s)}$$

Tal y como se vio en el apartado anterior, $G(s)$ es conocida para distintos intervalos del rango de operación de cada muestra, a partir de la linealización del modelo (ver ecuación (2.20)), mientras que la función de transferencia que modela las variaciones en la temperatura de la muestra de ensayo en función las variaciones en la radiación, también es conocida debido a esa misma linealización. Por tanto, desarrollando la expresión anterior se llega a la expresión final (que ya se demostró en la ecuación (2.25):

$$FF(s) = \frac{k_I}{k_U}$$

Una vez obtenida esa expresión, se realizará el diagrama que se mostró en la Figura 2.9.

Por tanto, dada la no linealidad del modelo, a continuación se estudiará la no linealidad que presenta este modelo de la radiación para todo el rango de operación de la apertura de la persiana y de la radiación solar, determinando cómo actuar en función de lo obtenido. Empezando por la muestra de acero A316-L, se obtiene el siguiente resultado, mostrado en la Figura 3.232, tras barrer para todo el rango de operación de la apertura de la persiana y la radiación solar gracias a la ecuación (2.21):

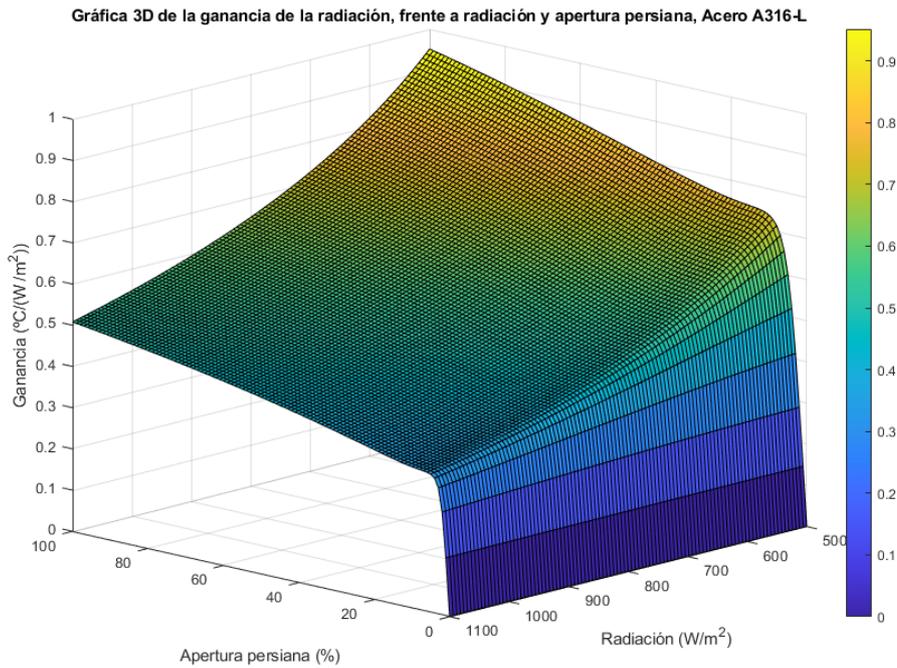


Figura 3.232. Gráfica de la variación de la ganancia k_1 del modelo lineal de la radiación frente a la apertura de la persiana y la radiación solar. Muestra de acero A316-L.

Se observa que la variación que presenta el sistema es pequeña para todo el rango de operación (aclarando que el término “pequeña” es al comparar la variación que se da en esta ganancia con las que se obtuvieron para el modelo lineal de la planta, ya que esta variación podría considerarse muy grande comparada con la dinámica de otros procesos), no llegando a la unidad. Posteriormente, al igual que con la muestra de acero A316-L, ahora se obtiene el resultado para la muestra de zirconia blanca, que muestra un resultado muy parecido (ver Figura 3.233):

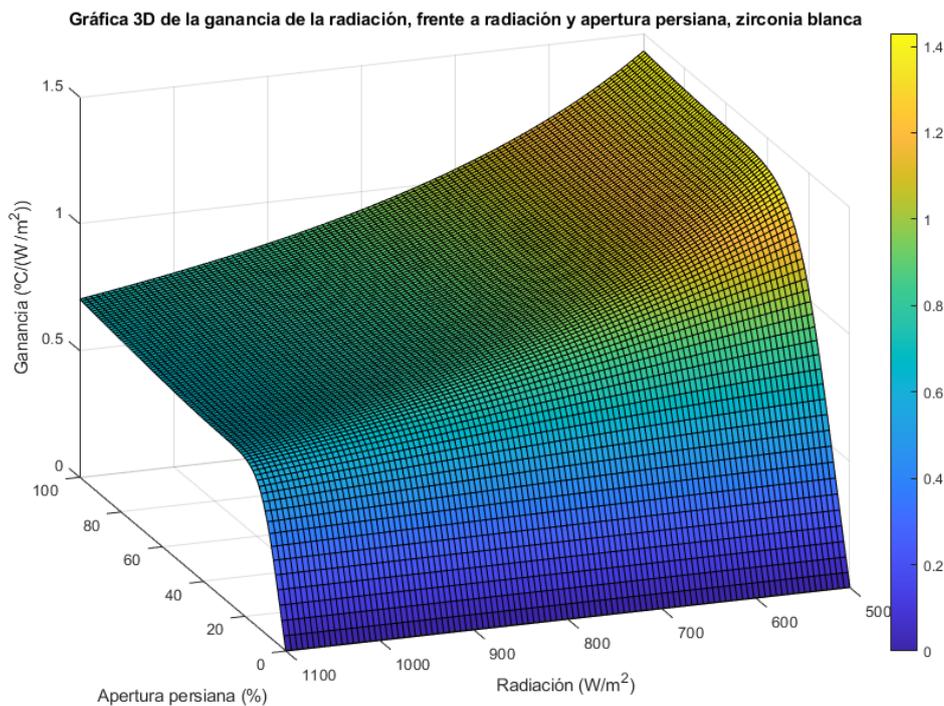


Figura 3.233. Gráfica de la variación de la ganancia k_1 del modelo lineal de la radiación frente a la apertura de la persiana y la radiación solar. Muestra de zirconia blanca.

Para la muestra de zirconia blanca se ve que posee una mayor ganancia en su modelo lineal de la radiación que el acero, por lo que se verá afectada en mayor medida ante cambios en esta perturbación.

Seguidamente se muestra en la Figura 3.234 la variación de la ganancia del modelo lineal de cobre según la apertura de la persiana y la radiación, para una temperatura ambiente de 25 °C:

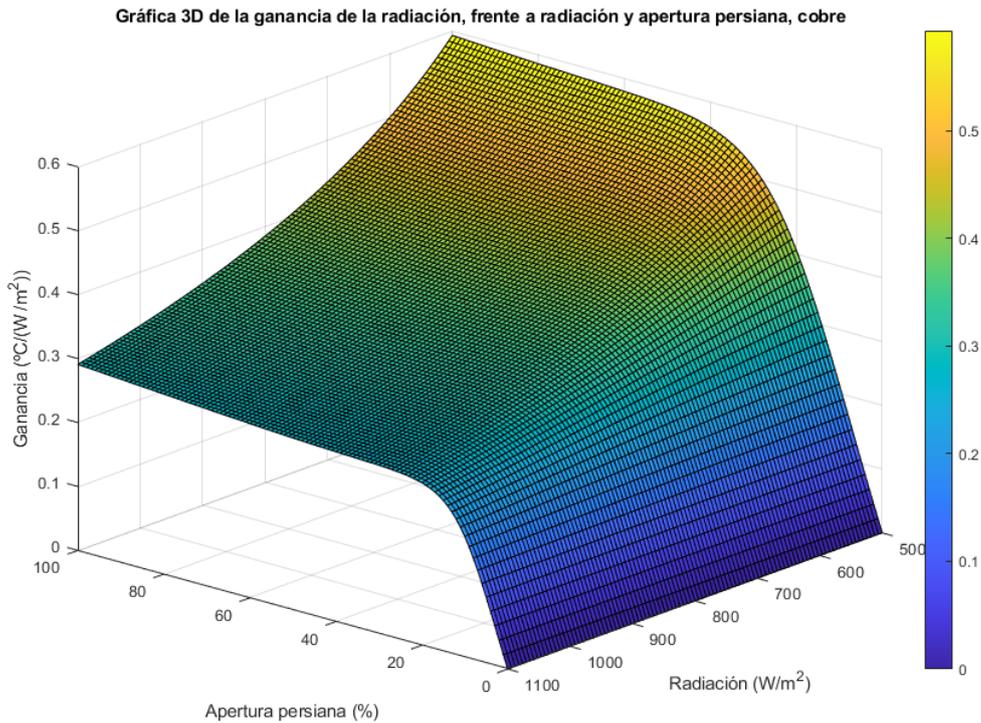


Figura 3.234. Gráfica de la variación de la ganancia k_I del modelo lineal de la radiación frente a la apertura de la persiana y la radiación solar. Muestra de cobre.

Para la muestra de cobre se obtienen resultados muy parecidos que con las anteriores muestras, donde el rango que abarca esta ganancia es muy pequeño, y más aún para esta pieza de cobre.

Por último, se muestra en la Figura 3.235 la variación de la ganancia k_I del modelo de la radiación en función de la apertura de la persiana y de la radiación, sus dos entradas más determinantes, considerando la temperatura ambiente igual a 25 °C, para la muestra de carburo de silicio.

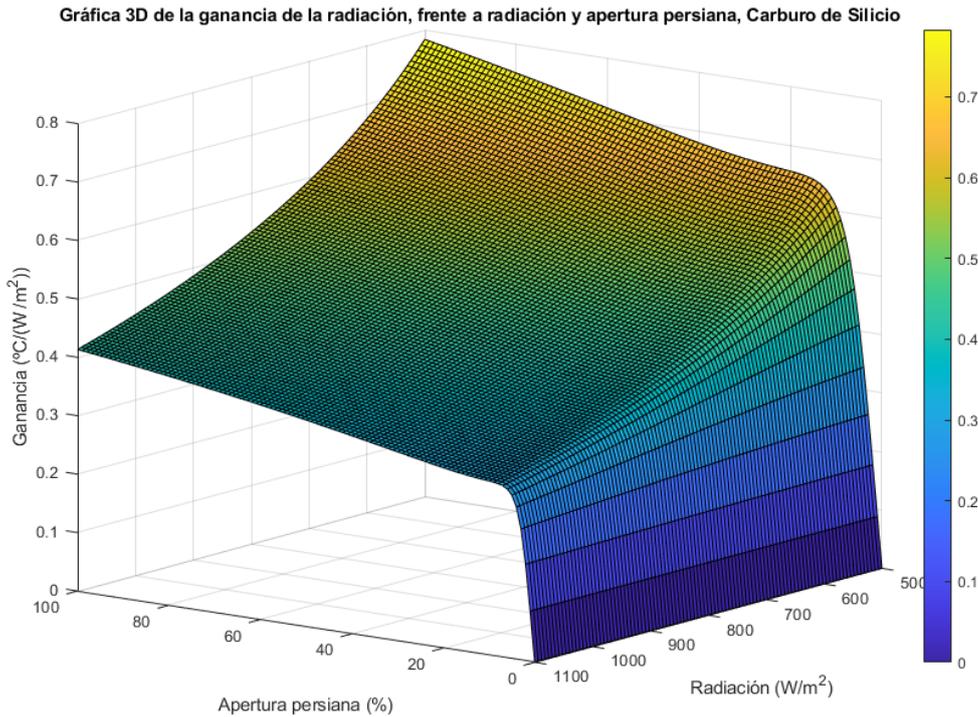


Figura 3.235. Gráfica de la variación de la ganancia k_I del modelo lineal de la radiación frente a la apertura de la persiana y la radiación solar. Muestra de carburo de silicio.

En general, los resultados obtenidos sugieren que la ganancia del modelo lineal de la radiación es muy pequeña (en comparación con la ganancia de los modelos lineales de la planta calculados para sus respectivas muestras) en todos los casos, y no tiene sentido realizar la división en rangos como se hizo para los modelos lineales de la apertura de la persiana del apartado anterior. Dados estos valores de ganancia, se extrae una conclusión fundamental y es que la radiación tiene una influencia muy grande en la ganancia de la propia apertura de la persiana, pero no de forma independiente en su modelo lineal.

Por tanto, se valoran dos opciones: usar el valor medio de los valores de la ganancia (donde de hecho se ve que corresponden con la parte más plana de la gráfica donde hay una gran distribución de valores de ganancia alrededor de este valor medio), o utilizar un control que adapte la ganancia para todo el rango de operación, ya que la expresión del *feedforward* de la ecuación (2.25), si se introducen las expresiones del modelo linealizado de la ganancia respecto de la apertura de la persiana (ver ecuación (2.22)) y de la ganancia respecto de la radiación (ver (2.21)), queda como sigue:

$$FF(s) = \frac{k_I}{k_U} = \frac{\frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_{f(90\%) \text{ sen } \alpha_0}} \cdot \alpha_a \left(\text{sen } \alpha_0 - \text{sen} \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right)}{4\alpha_e \sigma \bar{T}^3 + \alpha_c} \cdot \frac{\frac{\rho_h \rho_c S_c}{S_{f(90\%) \text{ sen } \alpha_0}} \cdot \alpha_a \cdot \frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right]}{4\alpha_e \sigma \bar{T}^3 + \alpha_c}$$

Simplificando términos comunes, como los denominadores de ambas ganancias o el primer grupo de términos que se repiten en ambas expresiones de la (2.21) y (2.22). Así

se obtiene la expresión que modela el controlador anticipativo en todo su rango de operación:

$$FF(s) = \frac{\left(\text{sen } \alpha_0 - \text{sen } \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right] \right)}{\frac{\alpha_0 \bar{I}}{100} \cos \left[\left(1 - \frac{\bar{U}}{100} \right) \alpha_0 \right]} \quad (3.1)$$

Como se puede observar, solamente queda una expresión (ver ecuación (3.1)) que depende de la radiación y apertura de la persiana del punto de operación. Finalmente, será con esta expresión con la que se trabajará pues se trata de una expresión sencilla de implementar, tanto como la opción de utilizar el valor medio de ganancia del modelo de la radiación de cada muestra, pero mucho más eficaz y con la ventaja que es adaptativo al punto de operación. Como el sistema nunca trabaja en un estado estacionario, se calcularán los valores de apertura de persiana y radiación en el punto de operación como la media de los últimos 5 valores muestreados.

3.4 Resultados de control

3.4.1 PI + *antiwindup* + control por adelanto

Con el objetivo de controlar en todo el rango de operación, se crea un mecanismo de supervisión donde, en función del punto de operación en el que se encuentre trabajando en cada instante del ensayo, este mecanismo cambie los parámetros del modelo lineal que se utilizan para calcular el controlador PI (en definitiva, k y τ). Por tanto, a partir de ahora se muestran los resultados de control tras aplicar el sistema al completo, es decir, un banco de controladores PI que conmuta de uno a otro con un mecanismo de transferencia sin saltos en función del rango de operación, con un mecanismo *antiwindup* para evitar la saturación del efecto integral y un control anticipativo o *feedforward* que varía también en función del punto de operación en el que esté.

El esquema definitivo es el mostrado en la Figura 3.236, donde se muestra en un bloque de color azul el subsistema donde están los controladores PI, cuyas entradas al bloque del banco de controladores son: la apertura de la persiana tras las no linealidades (bloque de color rojo) que se utiliza para realizar el esquema *antiwindup*, la transferencia sin salto y también para la selección del controlador; la radiación (que se introduce internamente con un bloque de memoria, y no se muestra en la Figura 3.236 para no complicar más el esquema), y el error entre la referencia y la salida. Por otra parte, de color magenta está el modelo no lineal, mientras que de color amarillo se muestra la función de MATLAB que representa el controlador anticipativo, que se suma a la salida del controlador PI.

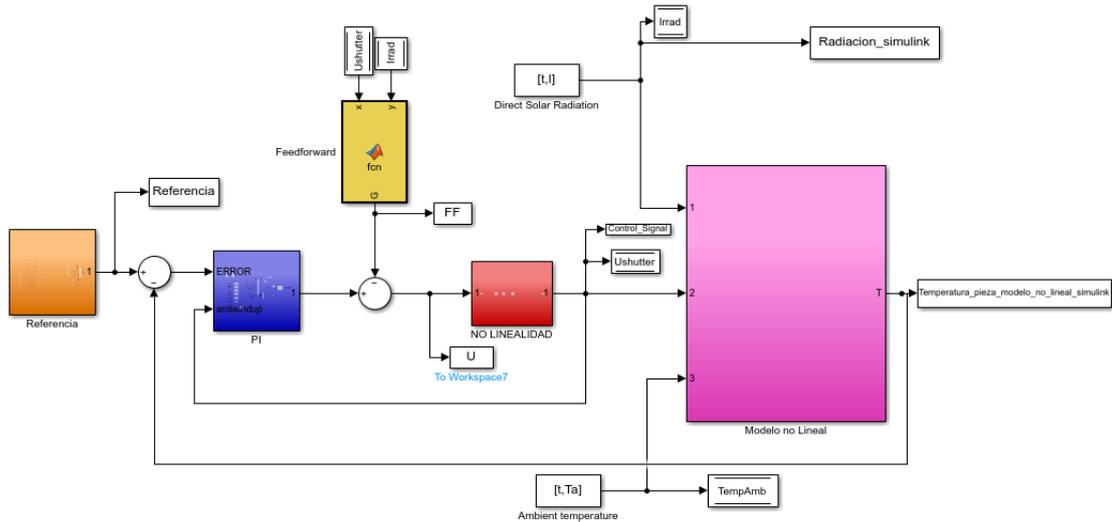


Figura 3.236. Esquema final del controlador PI + antiwindup + controlador anticipativo.

A su vez, el interior del bloque PI de color azul se trata de un banco de controladores PI (el interior de dicho bloque se muestra en la Figura 3.237, con el banco de controladores en color azul cian y la función de MATLAB que selecciona el controlador de color naranja), que conmutan en función de la radiación en cada instante y de la propia apertura de la persiana. Cada PI ha sido montado por bloques para poder implementar la transferencia sin saltos y *antiwindup* para compensar el efecto de las no linealidades en la apertura de la persiana. Viene mostrada su implementación del esquema de uno de los controladores PI en su forma ideal a continuación en la Figura 3.238, donde el integrador viene resaltado de color verde, y donde previamente se le incluye la acción del *antiwindup*.

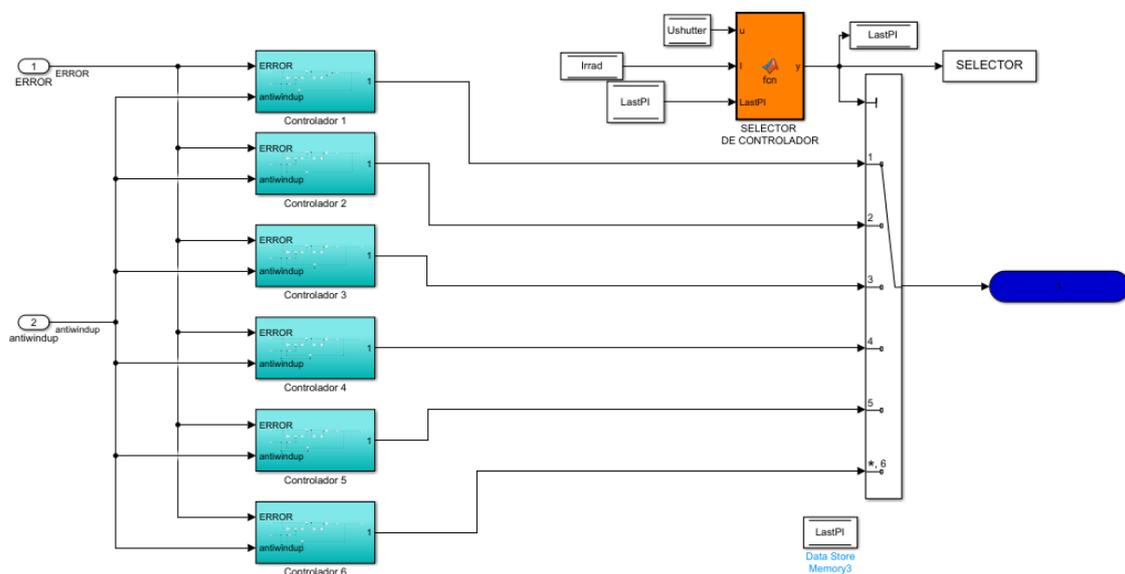


Figura 3.237. Esquema del banco de controladores (en azul cian) implementado, con entrada a cada controlador de la señal de error y de la apertura de persiana tras las no linealidades previas a la planta. En naranja, la función que selecciona el controlador en función del rango de operación

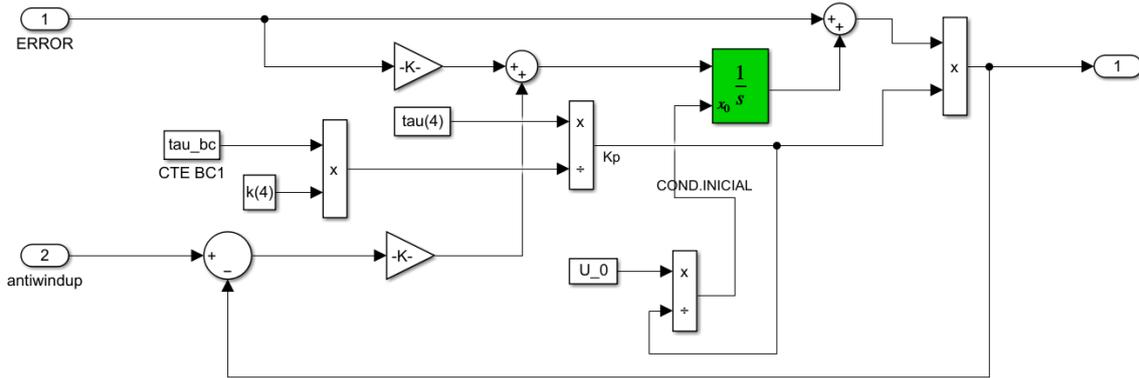


Figura 3.238. Esquema del controlador PI con la técnica antiwindup, y con las condiciones iniciales.

Antes de nada, primero se muestra en la Figura 3.239, Figura 3.240 y Figura 3.241 la contribución del controlador anticipativo o *feedforward* en la salida del modelo, ante variaciones de radiación. Por ello, se utiliza un vector de radiación del ensayo del día 8 de mayo de 2012, donde hubo presencia de nubes durante el mismo. Se puede observar que cuando se producen cambios en la radiación en la Figura 3.239, en torno a los 2000 segundos de radiación, el controlador anticipativo actúa en consecuencia reaccionando ante dichos cambios como se ve Figura 3.241. Sin embargo, dada la diferencia de ganancias entre k_U y k_I (recordar la ecuación (3.1)) la contribución del controlador anticipativo es muy pequeña dado que la propia radiación donde influye realmente es en la ganancia k_U y no tanto en k_I . Finalmente, la Figura 3.240 muestra la señal de control total (tras pasar por las no linealidades de la entrada).



Figura 3.239. Ensayo de controlador PI + antiwindup + control anticipativo para estudiar el efecto del control anticipativo, gráfica de la salida. Muestra de acero.

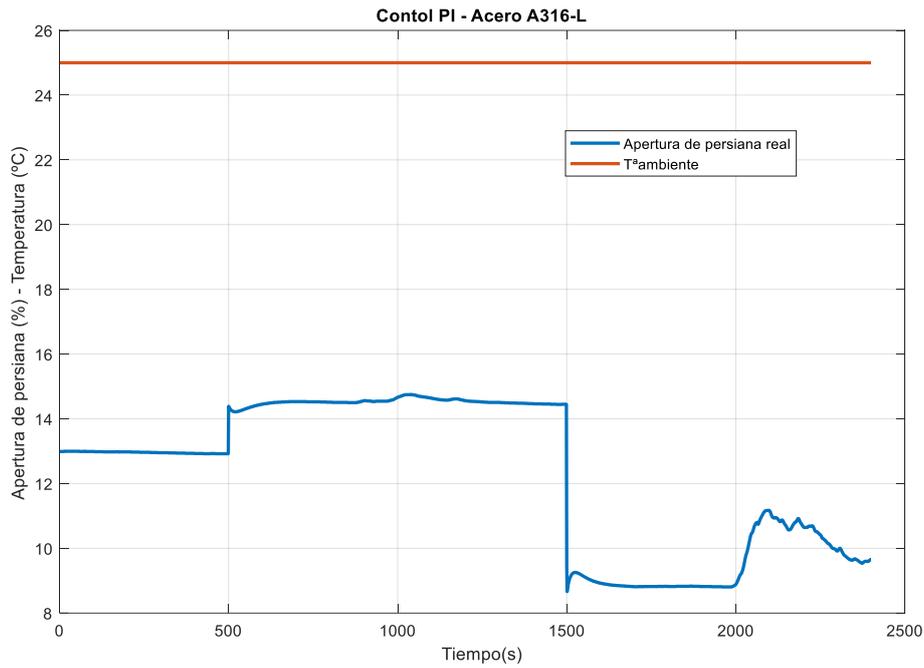


Figura 3.240. Ensayo de controlador PI + antiwindup + control anticipativo para estudiar el efecto del control anticipativo, gráfica de la apertura de la persiana (%). Muestra de acero.

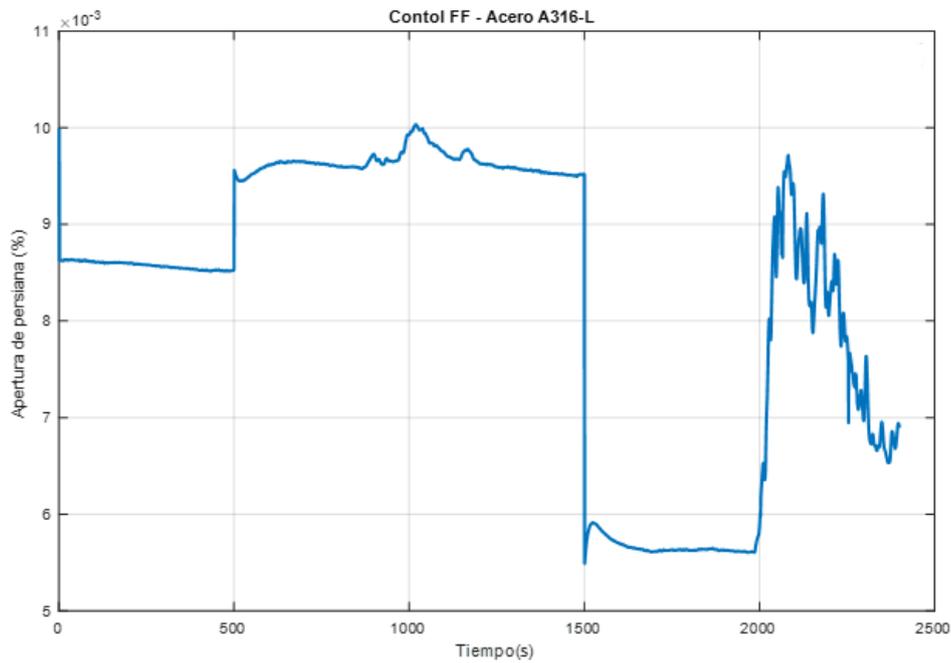


Figura 3.241. Ensayo de controlador PI + antiwindup + control anticipativo para estudiar el efecto del control anticipativo (%). Muestra de acero.

Seguidamente, se muestra en la Figura 3.242 y Figura 3.243 el resultado de control en un amplio rango de operación de la muestra de acero A136-L para una constante de tiempo en bucle cerrado igual a la constante de tiempo medio del rango de operación, siendo $\tau_{bc,acero} = 35$ s. Se ha escogido finalmente esta especificación, el valor medio de las constantes de tiempo de los modelos lineales (recordar Tabla 31) ya que las señales de control muy agresivas dan lugar a lo que se conoce como “castañeteo” (del ingles,

chattering), que es un fenómeno que se da cuando los cambios entre controladores no son suaves y la señal de control comienza sucesivamente a cambiar de un controlador a otro, generando dinámicas no deseadas. Para contrarrestar esto último se han creado espacios de seguridad en los rangos de operación límite entre controladores, para evitar este “castañeteo”. Esta idea ha sido estudiada a través de [12].

Se puede observar del ensayo que para un pequeño rango de apertura de la persiana (entre 15 % y 4 %) se trabaja en una zona muy amplia de temperatura de la muestra, dada la gran ganancia del modelo para la muestra de acero A316-L a aperturas de persiana bajas.

Por último, y lo más importante a destacar, es el error en estado estacionario casi constante (no lo es debido a que la radiación y la temperatura ambiente son variables en este ensayo) para la rampa introducida en la referencia en torno a los 2500 segundos de simulación. Este error es de aproximadamente 20 °C, lo cual no es un error realmente importante dada la escala de temperaturas en la que se trabaja (y el cual podría ser reducido si se introdujera una constante proporcional en el controlador más agresiva, y no se aseguraría aun así un error nulo, que además perjudicaría la actuación general de la estructura de control).

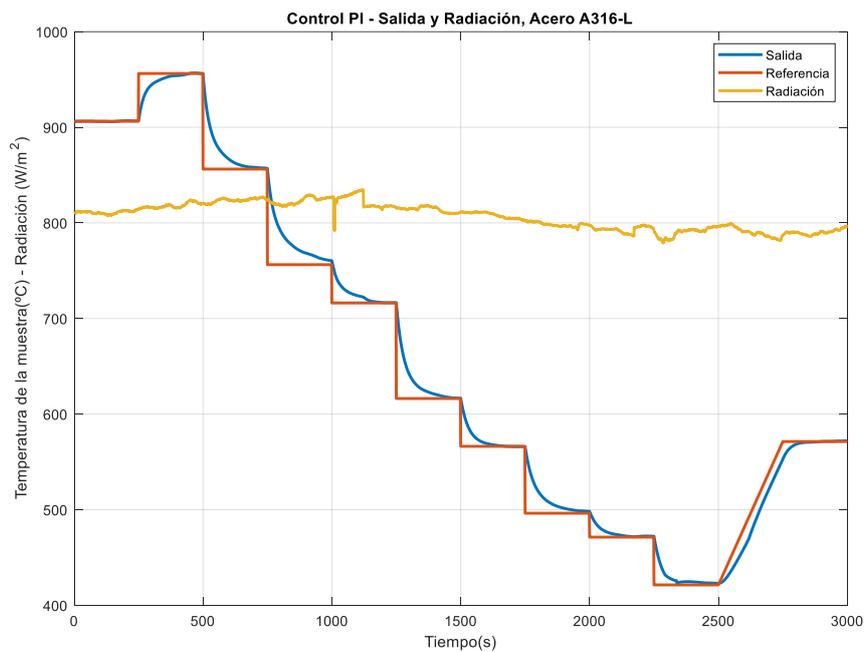


Figura 3.242. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

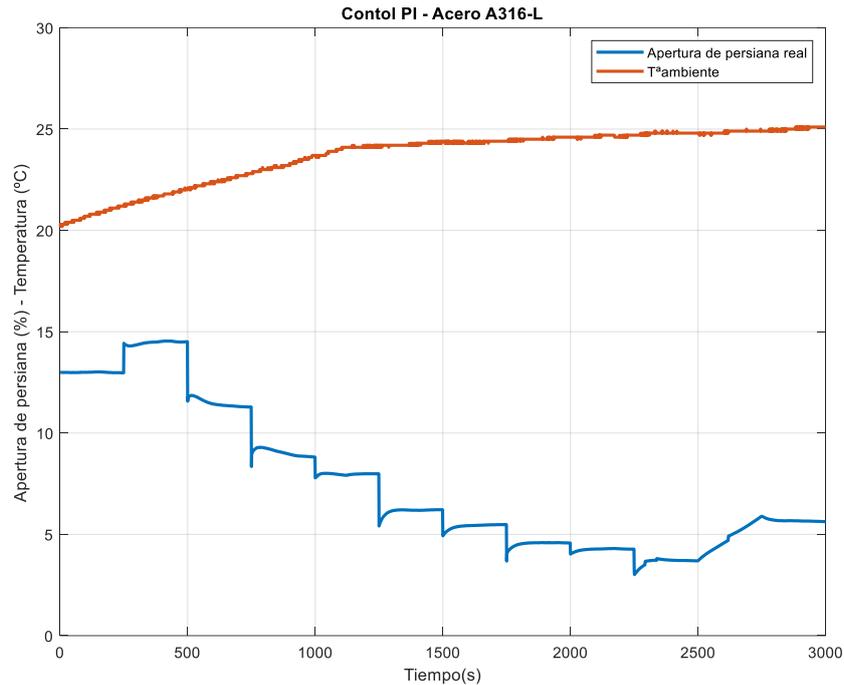


Figura 3.243. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana real y temperatura ambiente.

Seguidamente se le aplica el mismo vector de radiación pero esta vez se busca llegar a temperaturas más altas, para lo cual se aplicarán escalones esta vez ascendentes junto a una rampa descendente. Tal y como se observa, las conmutaciones entre controladores más los errores de modelado (que como se vio en la parte de validación, el modelo es muy fuertemente no lineal para todas las muestras) hace que en algunos puntos la salida se deteriore (por ejemplo, justo al aplicar el primer escalón) ya que los parámetros de los controladores son distintos y estos están diseñados con mucha incertidumbre a causa de los modelos lineales que se estimaron. Aun así, se considera que la respuesta que se obtiene en la Figura 3.244 y Figura 3.245 es aceptable, donde puede verse otra vez el error en estado estacionario ante referencia en forma de rampa. Además, durante la transición de la rampa (a mitad de la misma) se sucede un cambio de controlador que provoca una diferencia entre las constantes proporcionales de cada controlador provocando que la señal sea más brusca al bajar en el rango de apertura de la persiana.

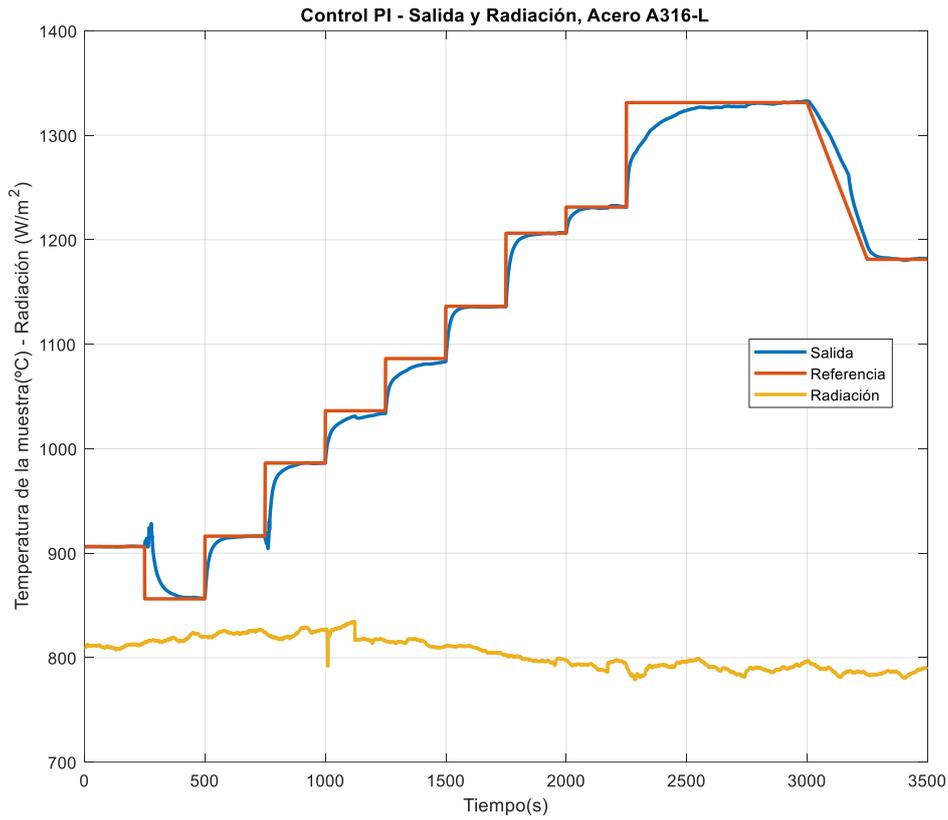


Figura 3.244. Ensayo (2) con la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

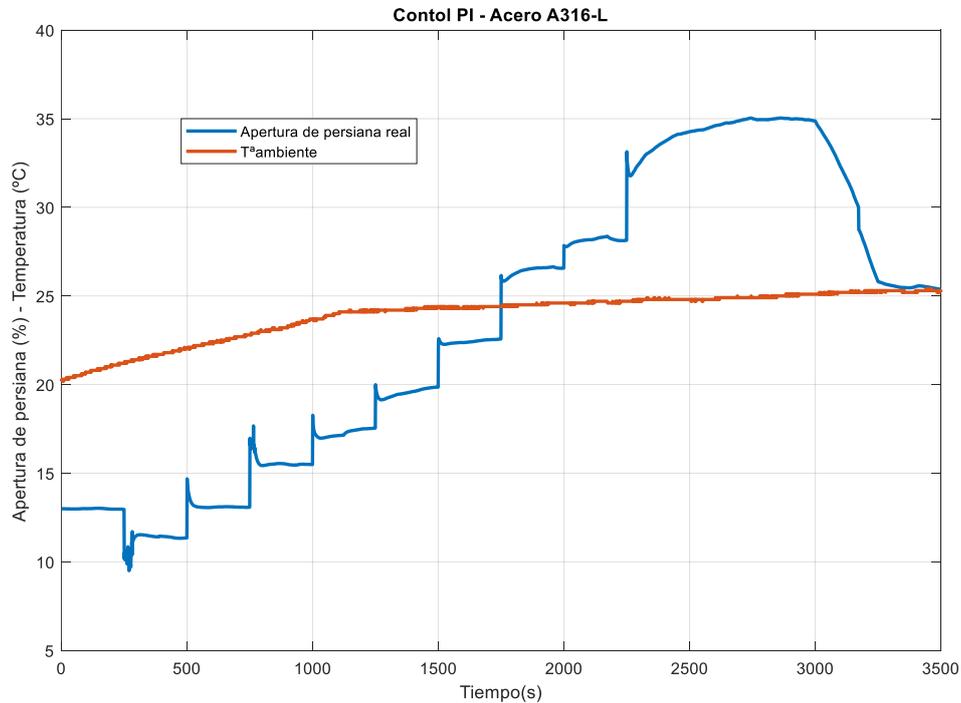


Figura 3.245. Ensayo (2) con la muestra de acero A316-L. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana real y temperatura ambiente.

Ahora se probará para una muestra distinta, la zirconia blanca, para la que se impone una constante de tiempo en bucle cerrado de 7 segundos, un valor intermedio de las constantes

de tiempo de cada modelo. El resultado con esta muestra es muy bueno, ya que además se trata de la muestra con menor constante de tiempo y es por tanto el más rápido, al imponerle la condición de que la constante de tiempo en bucle cerrado sea la media. Es tan rápida la respuesta que a simple vista se confunde con la propia señal de la referencia; por ello, en la Figura 3.248 se muestra un *zoom* de la gráfica de la salida en la zona de la rampa, para mostrar que el error en estado estacionario sigue existiendo para entradas en rampa, aunque sea de unos pocos grados.

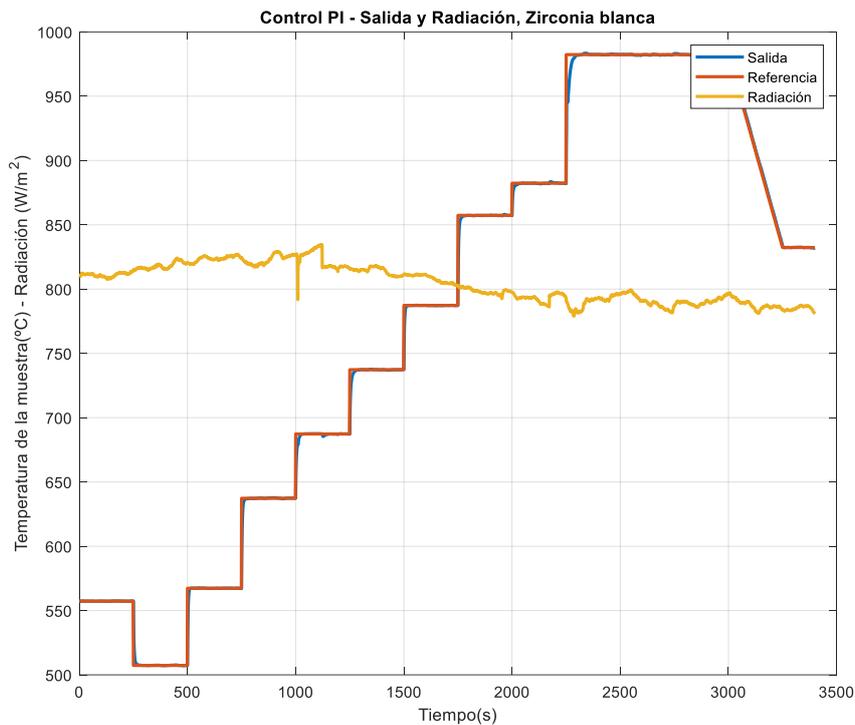


Figura 3.246. Ensayo (1) con la muestra de zirconia blanca. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

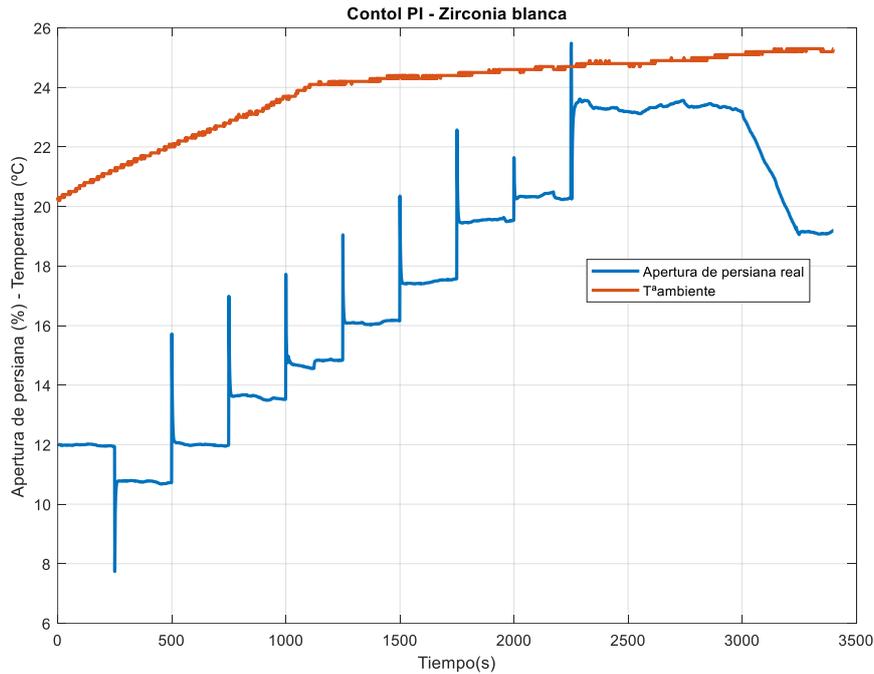


Figura 3.247. Ensayo (1) con la muestra de zirconia blanca. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

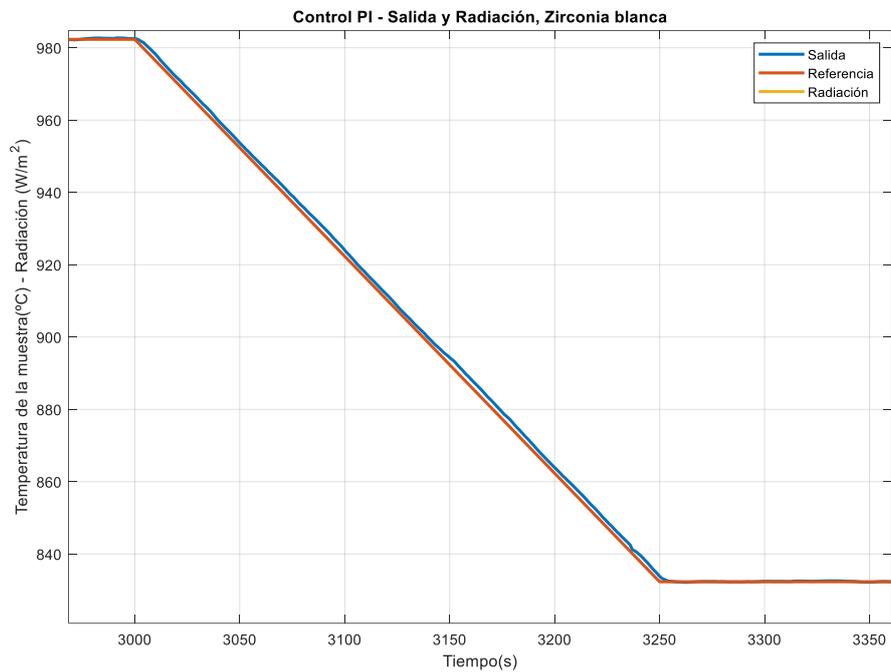


Figura 3.248. Zoom del ensayo (1) con la muestra de zirconia blanca. PI con antiwindup y control anticipativo. Error ante rampa, salida y referencia.

Se muestra ahora en la Figura 3.249 y Figura 3.250 el resultado para un ensayo de un par de escalones en la referencia para la muestra de cobre, donde al poseer una dinámica tan lenta, se le impone una restricción de que la constante de tiempo en bucle cerrado sea la constante de tiempo más rápida de los modelos lineales, es decir, en torno a 220 segundos

(nótese que de los modelos lineales que se calcularon y resumieron en la Tabla 58, la constante de tiempo más lenta era de 931.125 segundos). Se puede ver así que no se cumple la restricción impuesta, pues el 63 % del escalón dado en la referencia de 50 °C se da en los 516 °C, que se alcanzan cerca de los 588 segundos, es decir, casi 300 segundos después del escalón dado que fue a los 250. Sin embargo, esto tiene una explicación, y es que dado que la señal del controlador es muy agresiva y el horno tiene una limitación de velocidad de apertura de 5 % por segundo además de la saturación y el *encoder* del motor, el esquema *antiwindup* tiene en cuenta esta no linealidad y la compensa haciendo al controlador más lento; esto se ve con claridad en la Figura 3.251.

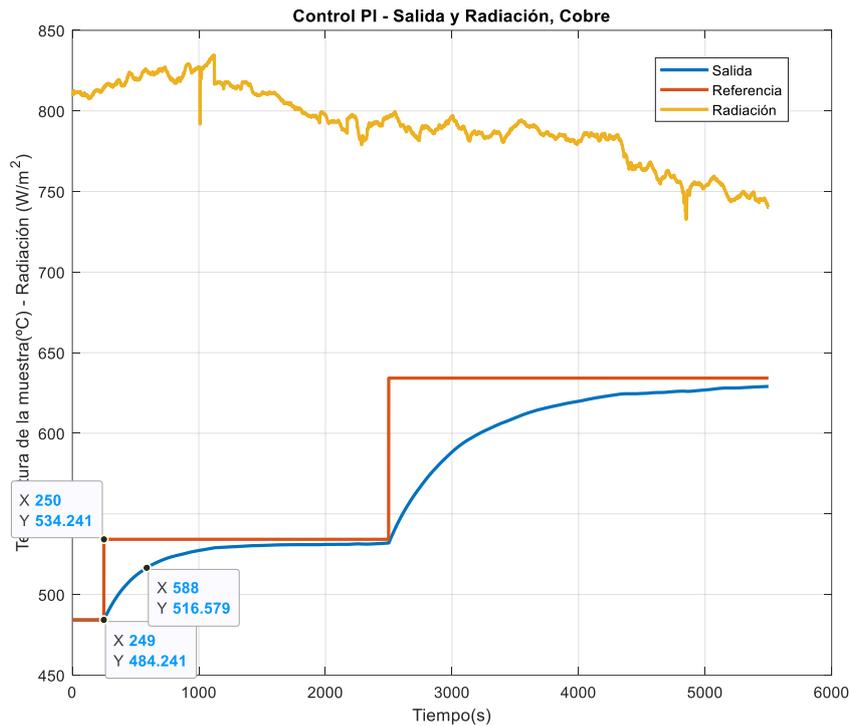


Figura 3.249. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con *antiwindup* y control anticipativo. Salida y radiación.

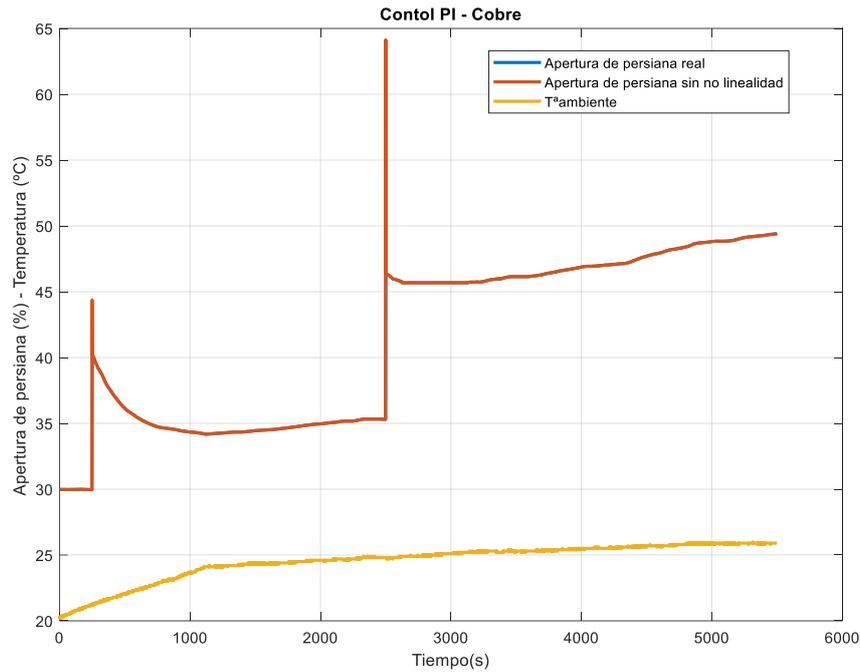


Figura 3.250. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

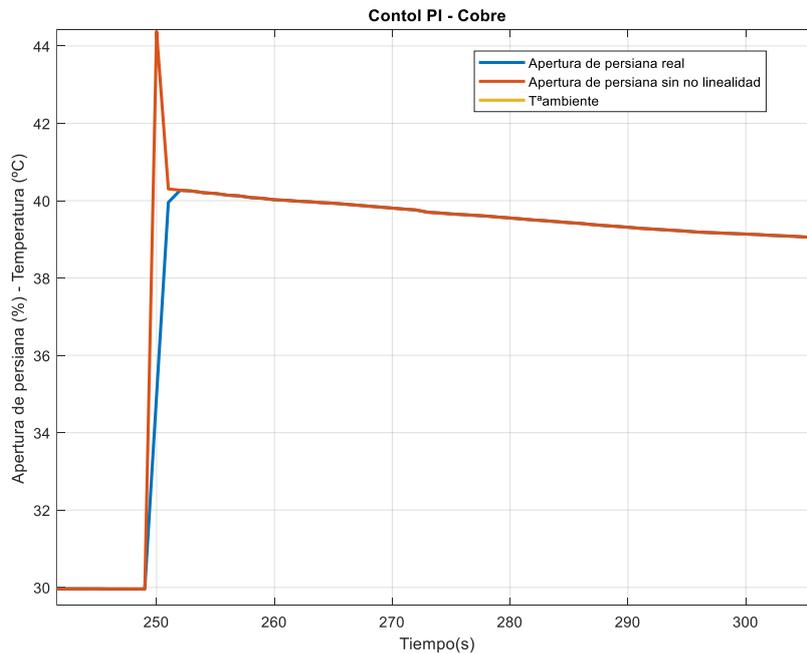


Figura 3.251. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Zoom de la apertura de la persiana y temperatura ambiente, en torno a los 250 segundos.

A continuación, se muestra otro ensayo más para la muestra de cobre en la Figura 3.252 y Figura 3.253, a una temperatura de operación más baja, donde se ha utilizado como constante de tiempo en bucle cerrado (la misma para todos) 0.8 veces la constante de tiempo del modelo lineal más rápido de la muestra de cobre. Esto repercute en que la señal de control sea agresiva puesto que se está en el rango de operación donde las

constantes de tiempo de los modelos lineales son las más altas, y se le está imponiendo un controlador agresivo (la constante de tiempo especificada para bucle cerrado es baja en comparación). Sin embargo, tal y como se muestra en la Figura 3.254, esto ocurre cuando no está implementada la técnica *antiwindup*, que detecta diferencias entre la señal antes de las no linealidades y después y compensa a la parte integral del controlador para reducir su valor.

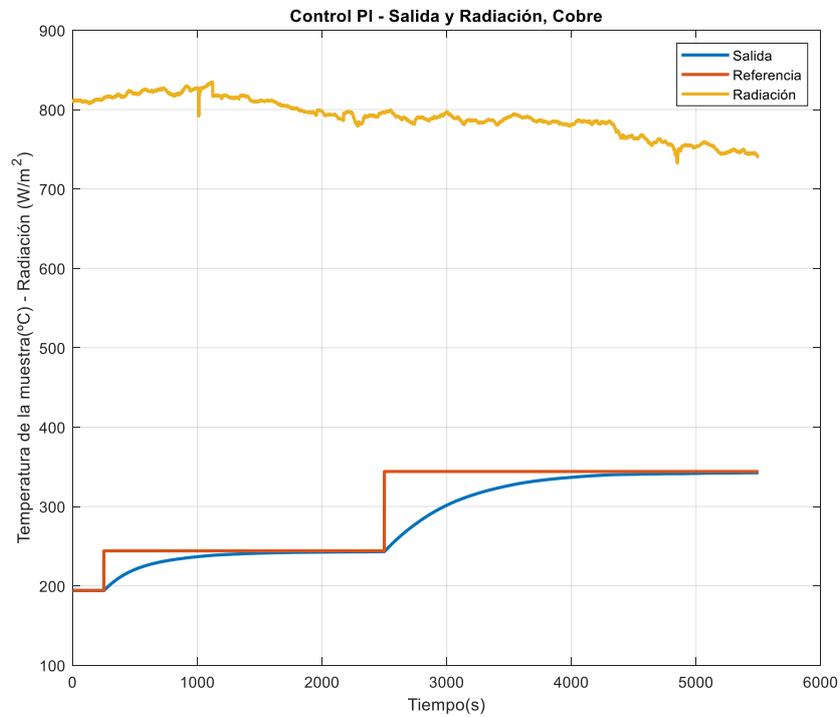


Figura 3.252. Ensayo (2) con la muestra de cobre. PI con *antiwindup* y control anticipativo. Salida y radiación.

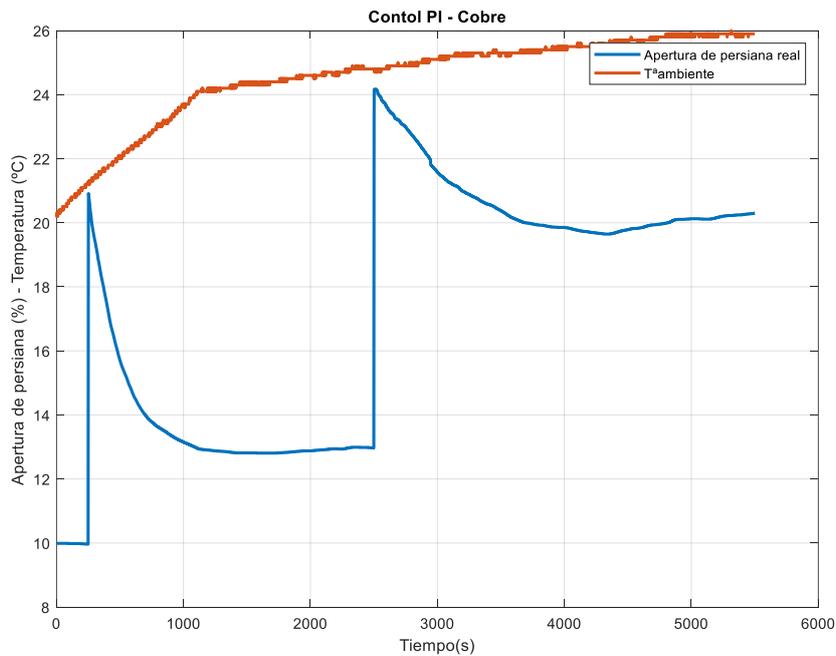


Figura 3.253. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con *antiwindup* y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

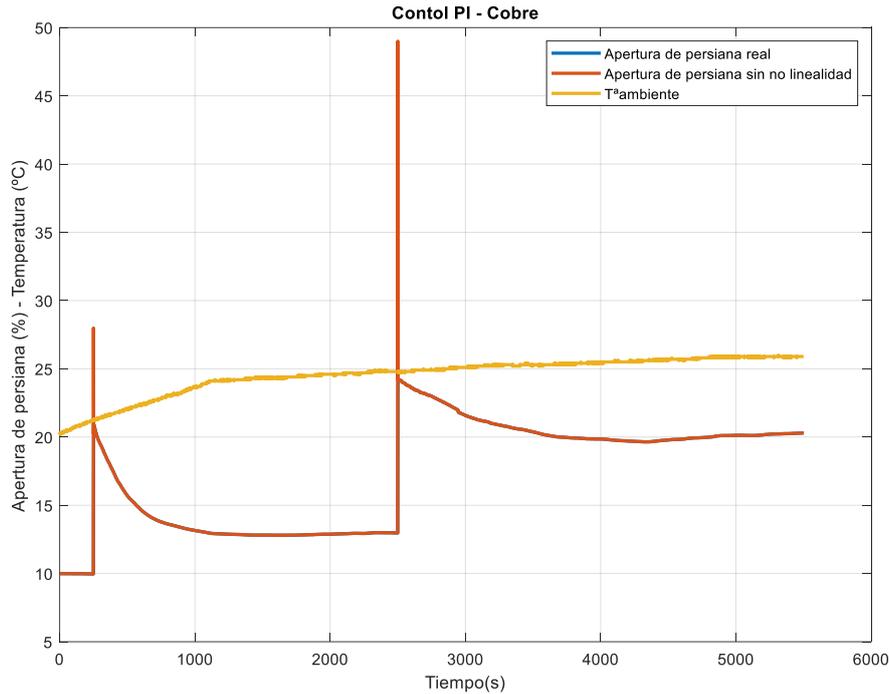


Figura 3.254. Ensayo (1) con la muestra de cobre. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana (sin antiwindup) y temperatura ambiente.

Por último, se muestra una simulación también para la pieza de carburo de silicio para validar el funcionamiento del controlador con esta muestra, para el mismo valor de radiación y temperatura ambiente. En el resultado, mostrado en la Figura 3.255 y Figura 3.256 se aprecia que los errores de modelado (que si se recuerda, el carburo de silicio presentó buenas validaciones en algunos intervalos pero peores en otros) provoca que la dinámica no sea perfecta, aunque se podría decir que el resultado es más que aceptable (teniendo en cuenta que se han escogido especificaciones en bucle cerrado muy conservadoras). Se ha introducido como constante de tiempo en bucle cerrado la segunda constante de tiempo más rápida de los modelos, para encontrar una solución que esté entre la rapidez y la buena dinámica de la salida del modelo.

Por último, añadir como observación que se aprecia un error constante entre la referencia de la rampa introducida y la salida, que en este caso es de unos 20 °C aproximadamente.

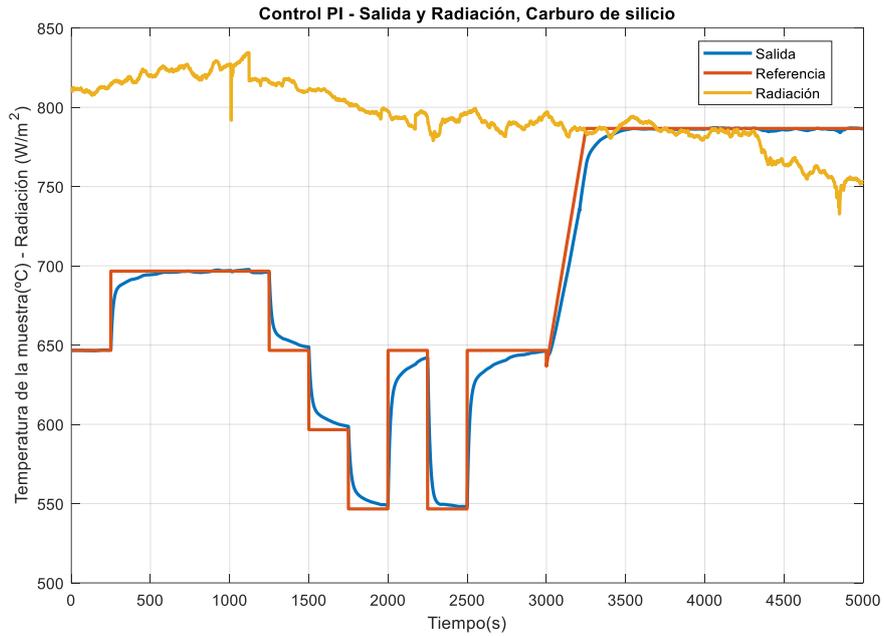


Figura 3.255. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

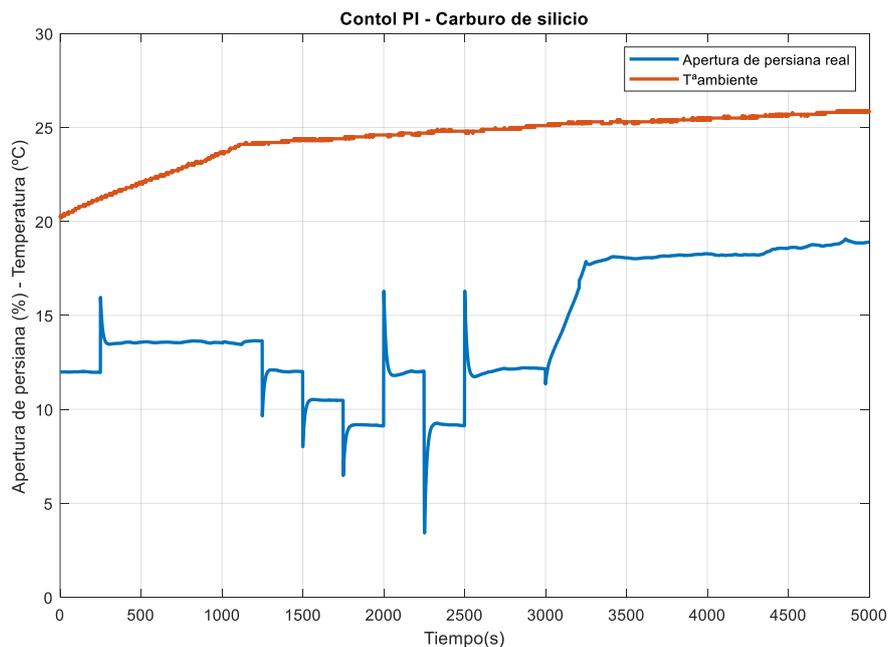


Figura 3.256. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

3.4.2 Doble PI + antiwindup + control por adelanto

Tras estudiar los resultados de aplicar un controlador PI para conseguir un error nulo frente a referencias en forma de escalón, donde se pudo apreciar un error constante entre la referencia y la salida del modelo cuando se introduce una referencia en forma de rampa, en esta parte se mostrará los resultados obtenidos tras aplicar un controlador compuesto de dos PI en serie. Esta nueva arquitectura de control permitirá que la salida alcance un

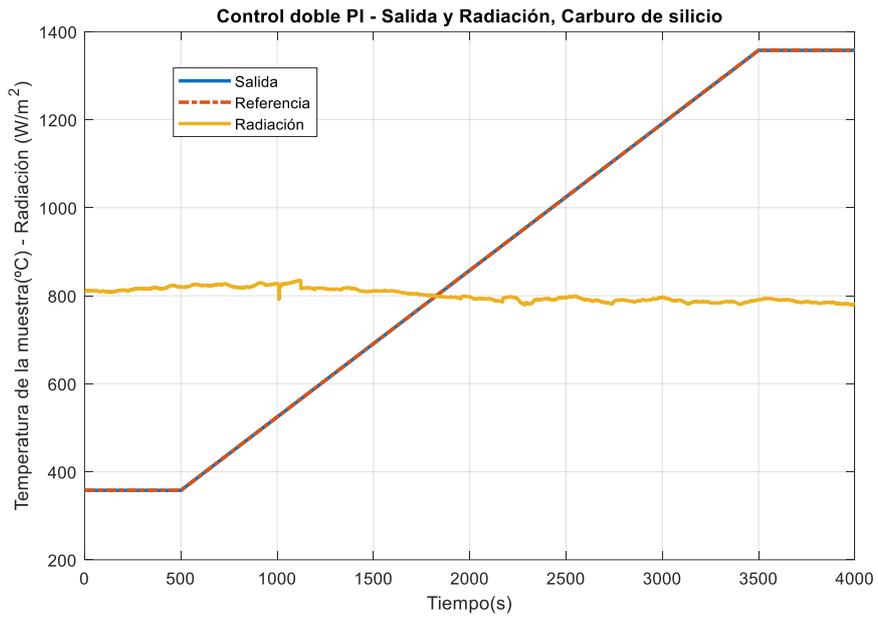


Figura 3.258. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

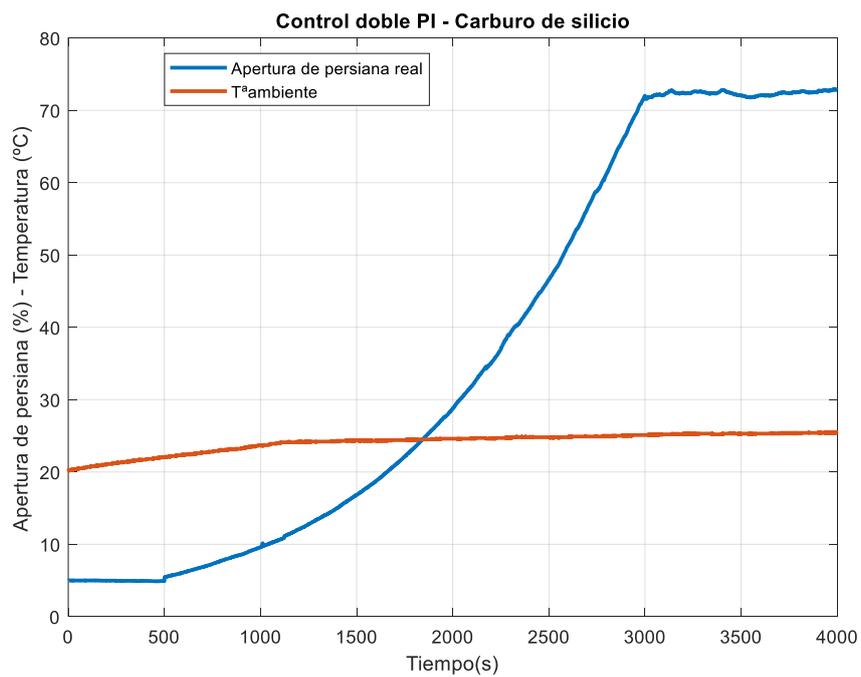


Figura 3.259. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

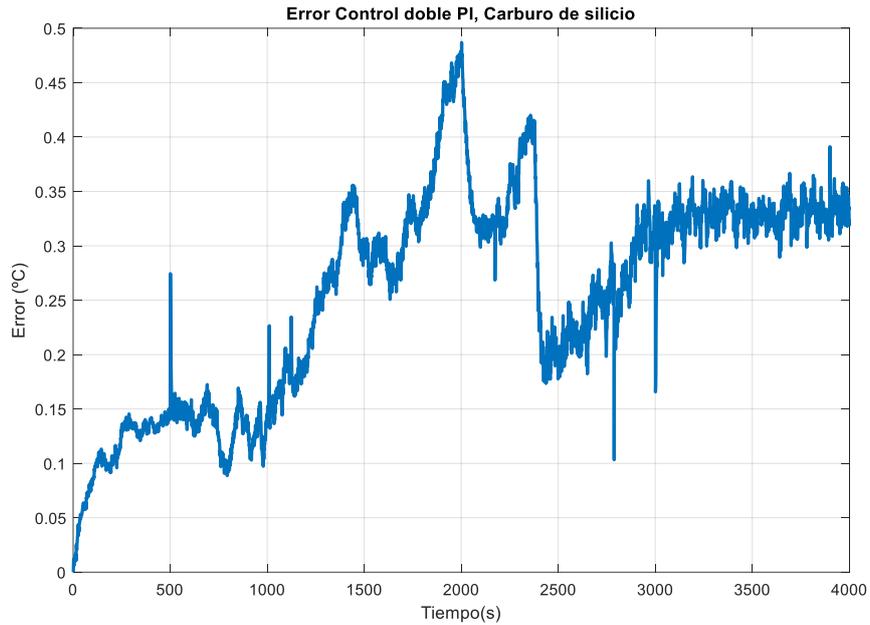


Figura 3.260. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

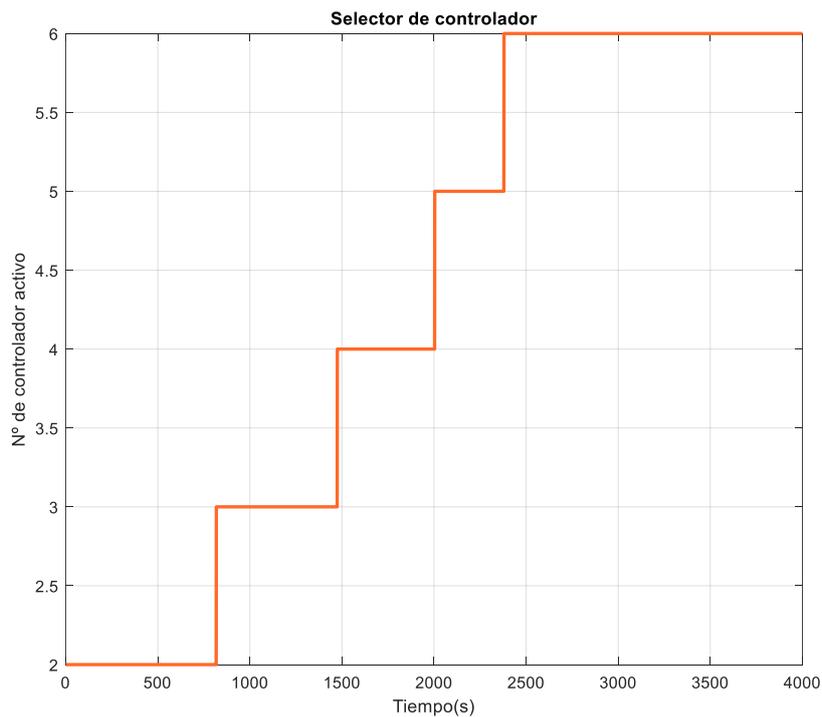


Figura 3.261. Ensayo (1) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Número del controlador activo.

Seguidamente se muestra la eficacia del modelo ante una referencia en forma de escalón en la Figura 3.262, junto con la señal de control y la temperatura ambiente en la Figura 3.263, donde se comprueba que el modelo responde bien ante cambios en la referencia en forma de escalón, aunque se considera la rapidez de la respuesta algo demasiado lenta con la que tiene para la rampa. Además, genera una señal muy agresiva en la señal de

control, probablemente influenciada también por la conmutación de un controlador a otro y por el cero que aparece en la función de transferencia en bucle cerrado, que provoca un aumento brusco en la señal de control.

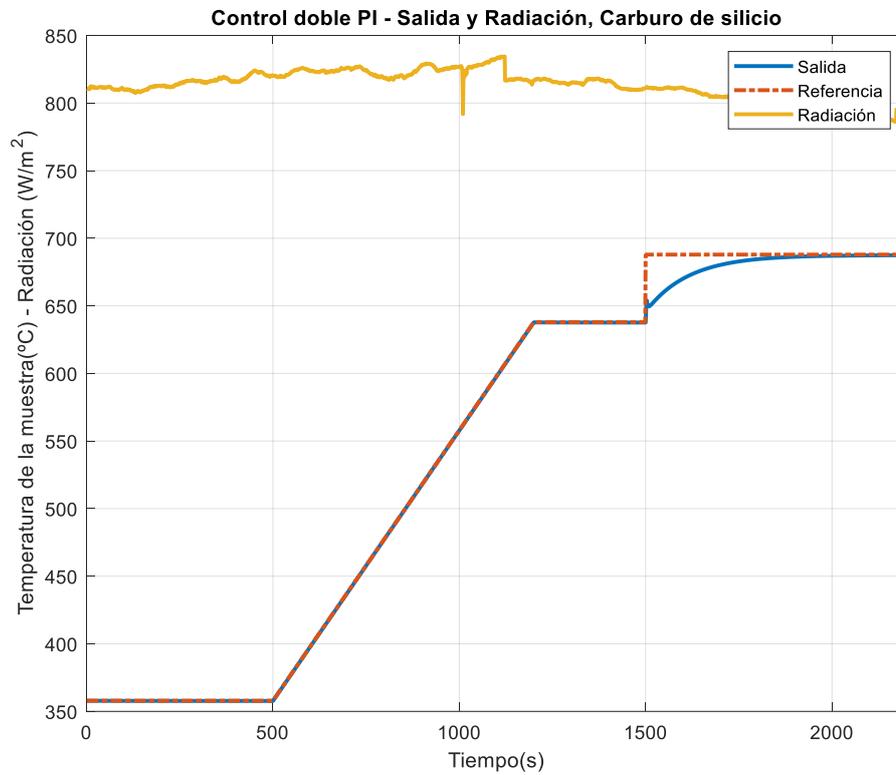


Figura 3.262. Ensayo (2) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

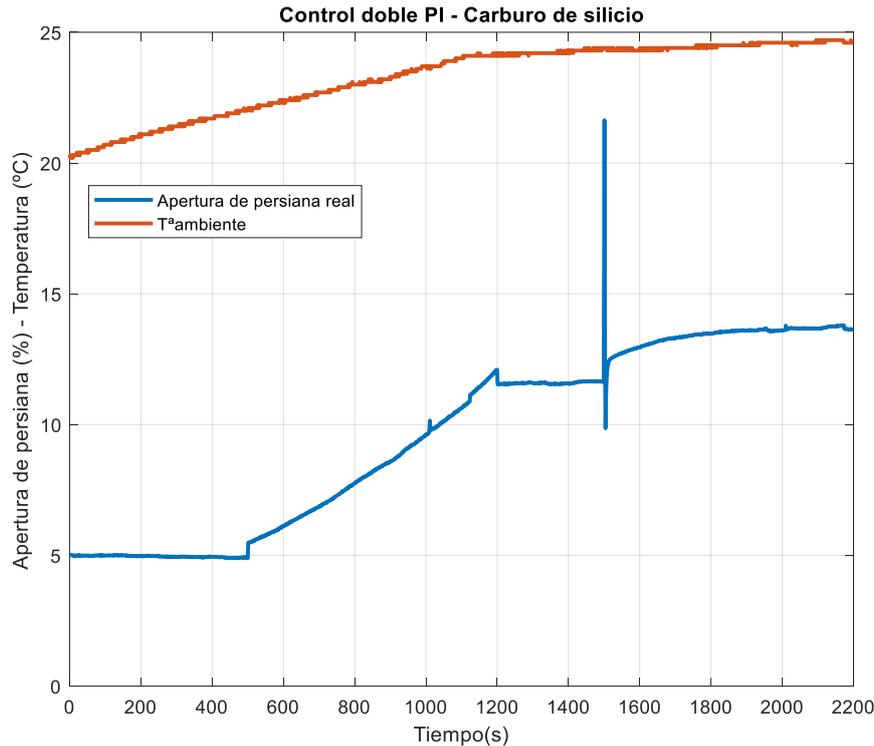


Figura 3.263. Ensayo (2) con la muestra de carburo de silicio. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

Finalmente, se muestra en la Figura 3.264 y Figura 3.265 una última simulación con otra muestra distinta, en este caso, con la muestra de cobre, para la cual se utiliza el vector de radiación y temperatura ambiente del día 3 de marzo de 1997. En este ensayo se comprueba el comportamiento del modelo no lineal ante la referencia en forma de rampa, y posteriormente se aplica un cambio en la referencia en forma de escalón en torno a los 1900 segundos de simulación.

El seguimiento ante la referencia en forma de rampa es muy bueno, dado que como se observa, el error es prácticamente cero durante su duración. Además, la radiación es muy variable y aun así la arquitectura de control diseñada permite alcanzar ese error nulo en el seguimiento de la rampa, gracias también en cierta medida a la contribución del control por adelantado. Por otra parte, la respuesta ante el cambio de referencia en forma de escalón es muy lento pese a que al final se consigue un error nulo en estado estacionario, y también el efecto del cero en bucle cerrado que posee el sistema provoca que ante cambios en forma de escalón en la referencia la señal de control se dispare (además provocando conmutaciones muy rápidas entre los controladores y empeorando la respuesta). Cabe recordar que la muestra de cobre posee el rango de constantes de tiempo con valores más altos, es decir, es el sistema más lento, por lo que se acentúa la lentitud de la respuesta. La última aclaración sobre esta simulación es que se ha utilizado, al igual que en los anteriores ensayos, una frecuencia natural en el sistema en bucle cerrado de $\omega_n = 10/\tau_{min}$ rad/s, siendo $\tau_{min} = 218.75$ s.

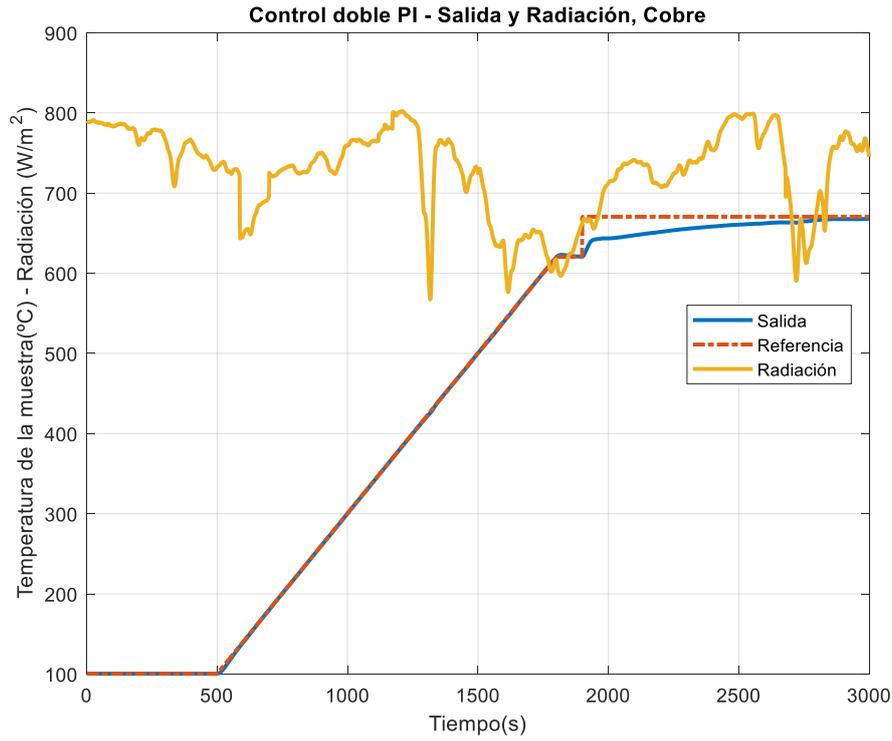


Figura 3.264. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

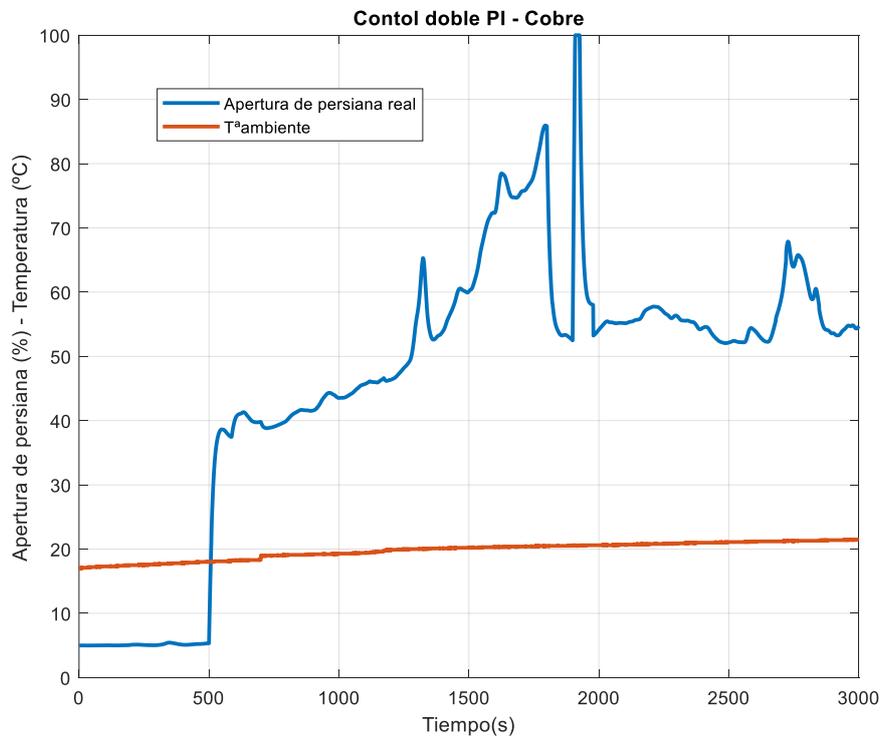


Figura 3.265. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Doble PI con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

3.4.3 Conmutación de controladores rampa-escalón

En esta sección se trabajará suponiendo que, a la hora de realizar ensayos en el horno solar, se conoce a priori el perfil del ensayo que se va a realizar. Normalmente para tratar una muestra o pieza se suele llevar a la muestra a un nivel de temperatura alto, donde se mantiene la temperatura constante durante un período, para luego enfriarla. Debido a ello, se hará algo parecido en este apartado con los cuatro tipos de muestras, donde se introducirá una referencia en forma de rampa hasta alcanzar una temperatura alta de la muestra; llegado a ese punto se mantendrá la temperatura de la muestra constante, y posteriormente se introducirá una referencia en forma de escalón que se mantendrá un cierto tiempo para posteriormente volver a la temperatura anterior y enfriar la muestra con una rampa.

A continuación, se muestra en la Figura 3.266 y Figura 3.267 se muestra el resultado de introducir el perfil ya establecido donde se introduce una rampa hasta llegar a una determinada temperatura, posteriormente se introduce dos escalones de la misma amplitud pero de signo contrario, y luego se deja enfriar la pieza de forma controlada con una rampa. El cambio entre controladores se produce a los 2000 segundos, para pasar de controlador para rampa a controlador para escalón, para lo cual el PI está diseñado con una constante de tiempo en bucle cerrado de 0.3 veces la constante de tiempo en bucle abierto del modelo más rápido para la muestra de cobre. Una vez se le dan los dos escalones pertinentes (donde las variaciones en la radiación solar deterioran en cierta medida la calidad de la señal de salida), se procede a cambiar al controlador para rampa a los 3250 segundos. Por último, se introduce la rampa para enfriar la pieza a los 3000 segundos, donde el controlador para rampa devuelve muy buenos resultados (pese a la caída en el nivel de radiación que se produce). La simulación se corta antes de volver al valor inicial de temperatura dado que el vector de radiación utilizado es demasiado corto.

Se muestra también el error de la referencia menos la temperatura del modelo para la muestra de cobre en la Figura 3.268, donde se aprecia que es prácticamente igual a cero durante toda la simulación, excepto cuando hay grandes variaciones en la radiación solar por un lado, y por otro como es lógico, en los cambios de referencia en escalón, que producen los picos de error más altos. Además, se muestra posteriormente en la Figura 3.269 el controlador ante rampa que está activo según el rango de operación, que puesto que se “barre” casi todo el rango, hay conmutaciones a casi todos ellos (no se incluye el cambio al controlador ante escalón pues se hace con una función aparte).

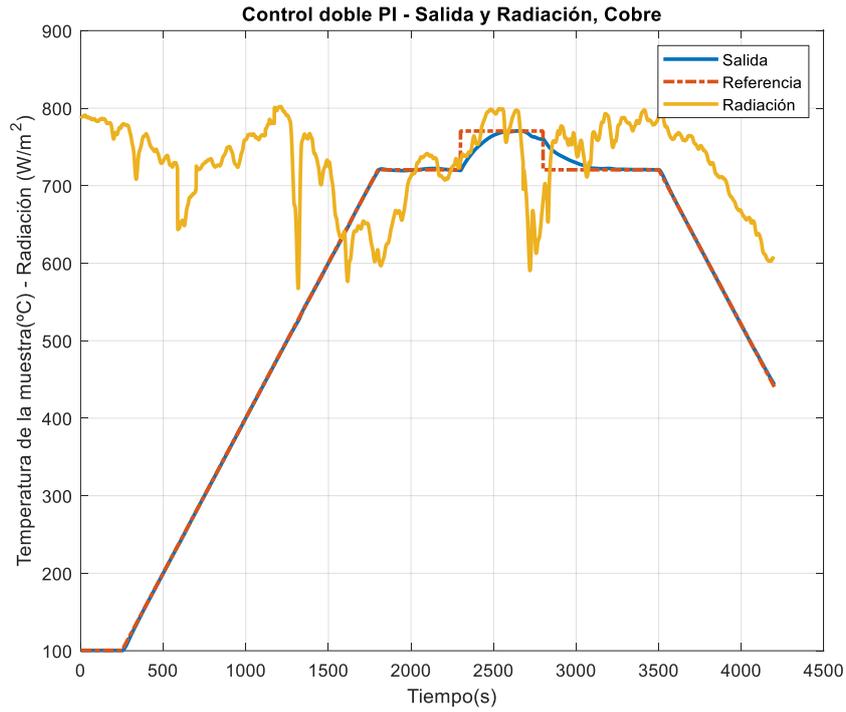


Figura 3.266. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

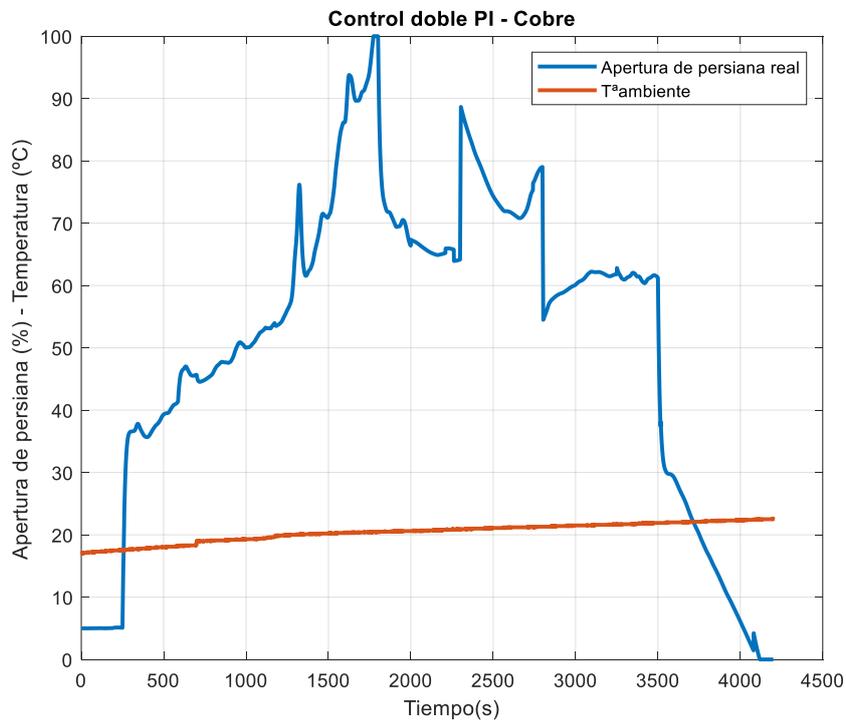


Figura 3.267. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

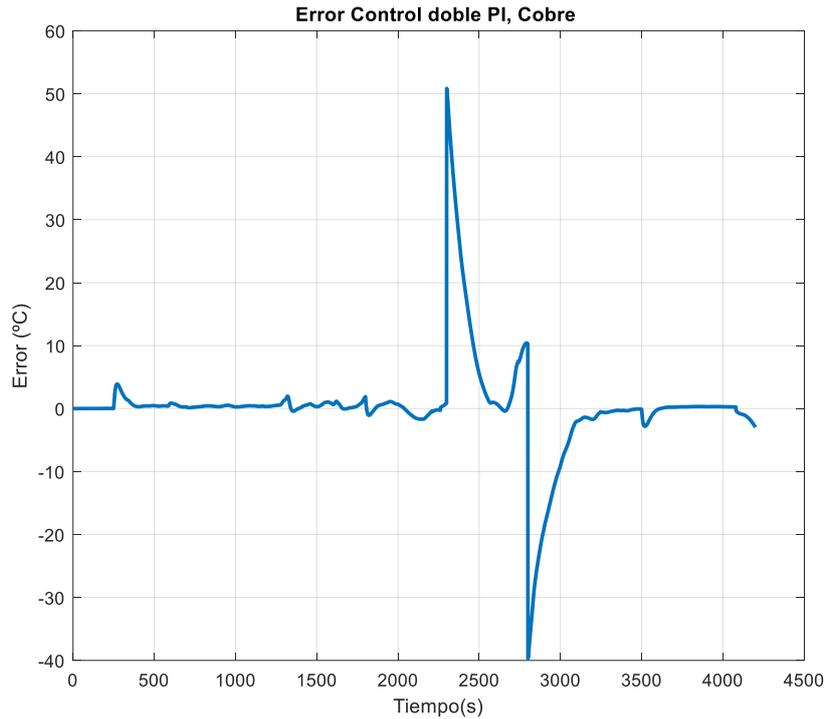


Figura 3.268. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Error entre referencia y temperatura.

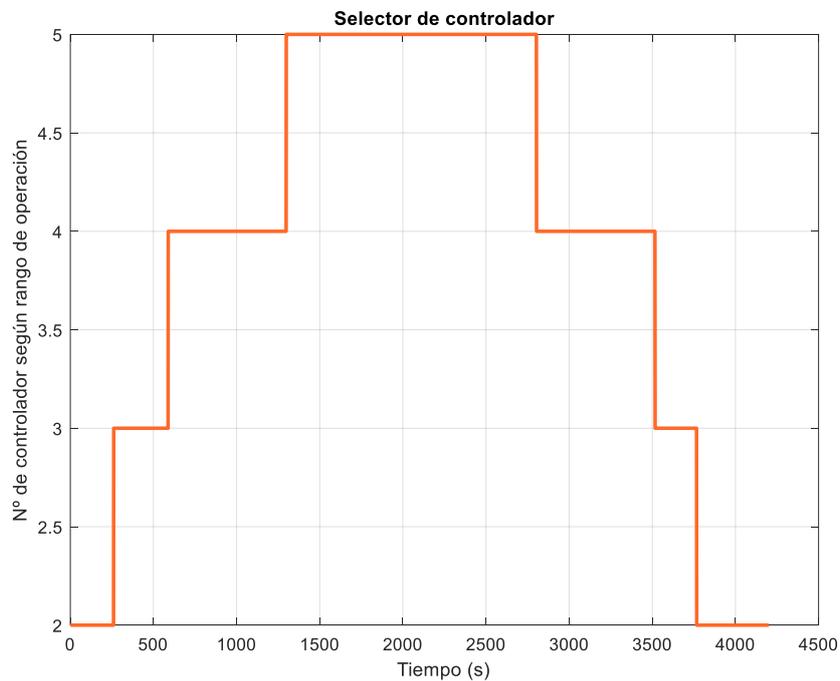


Figura 3.269. Ensayo (1) con la muestra de cobre. Número de controlador ante rampa que está activo en función del rango de operación en el que se trabaja. No se incluye el cambio de control ante rampa a control ante escalón y viceversa, que se dan a los 2000 y 3250 segundos.

Para finalizar con esta última sección del trabajo, se introduce el mismo perfil de ensayo para otra muestra, en este caso, la muestra de acero A316-L, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.270 y Figura 3.271, donde se aprecia que el seguimiento frente tanto a

escalón como a rampa se hace con error en estado estacionario nulo. El cambio de controlador de rampa a controlador de escalón se hace a los 2750 segundos, entre el final de la rampa y el principio del primer escalón de 100 °C en la referencia. Luego, tras esperar 500 segundos en la zona más alta de temperatura, se introduce el segundo escalón de la misma amplitud pero signo contrario, y se vuelve a cambiar de controlador a los 4250 segundos, para afrontar la referencia en forma de rampa que comienza a los 4500 segundos, con el objetivo de enfriar la pieza. La constante de tiempo en bucle cerrado para el diseño ante referencias a escalón es de 0.8 veces la constante de tiempo más rápida de los modelos lineales de la muestra de acero (recordar la Tabla 31, donde se muestra que la constante de tiempo del modelo lineal más rápido es de 9 segundos).

También se muestra seguidamente en la Figura 3.272 la gráfica del error, donde se aprecia que es prácticamente nulo durante toda la simulación excepto en los cambios en la referencia en forma de escalón que provocan los picos que se observan de 100 °C (amplitud de los escalones). Por su parte, la Figura 3.273 muestra la conmutación entre los controladores ante rampa que se han producido durante el ensayo, ya que se ha abarcado un amplio rango de operación de la muestra.

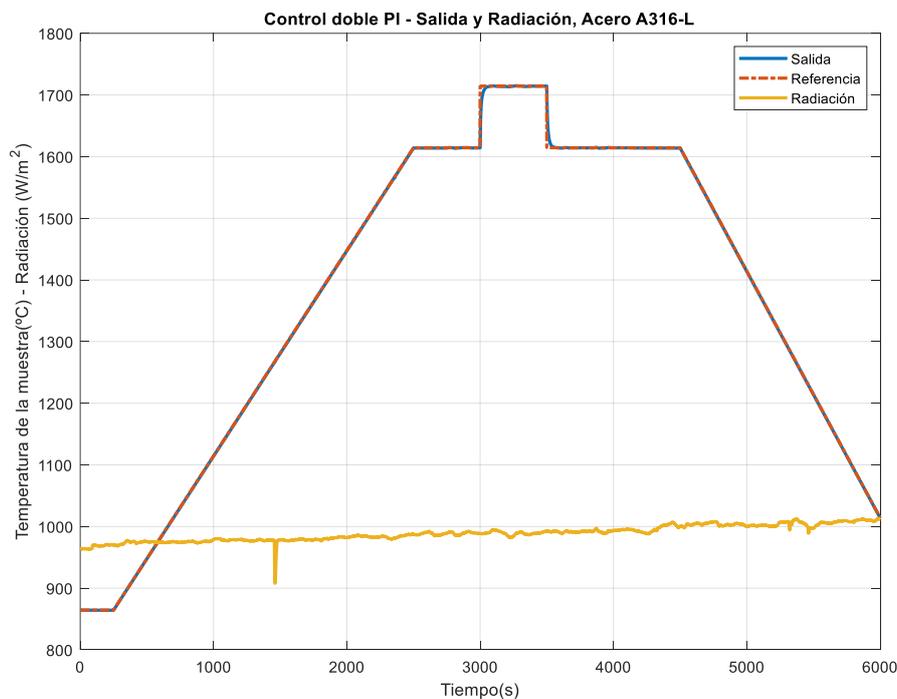


Figura 3.270. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Salida y radiación.

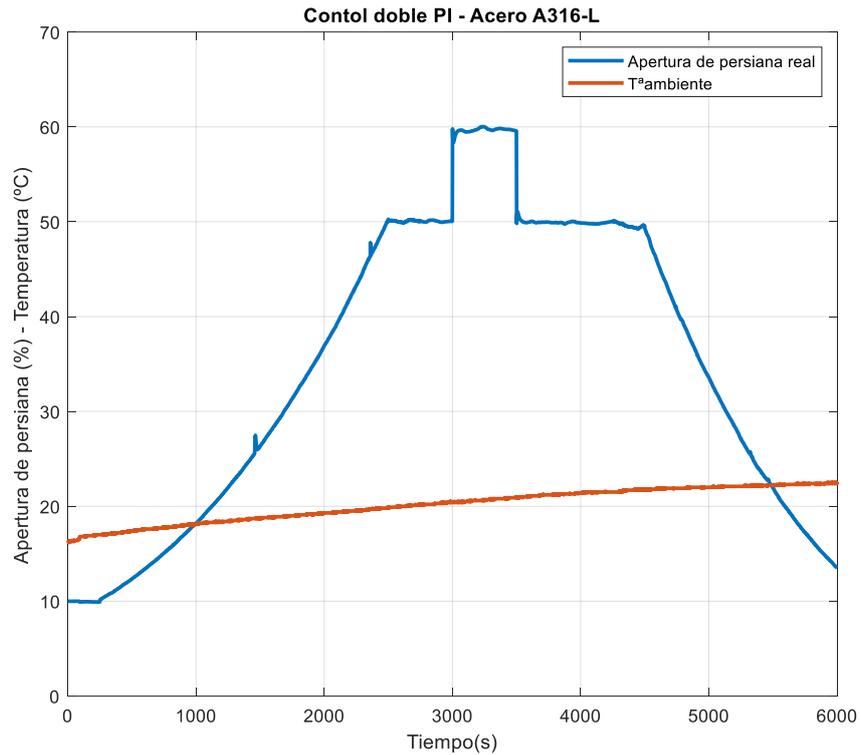


Figura 3.271. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

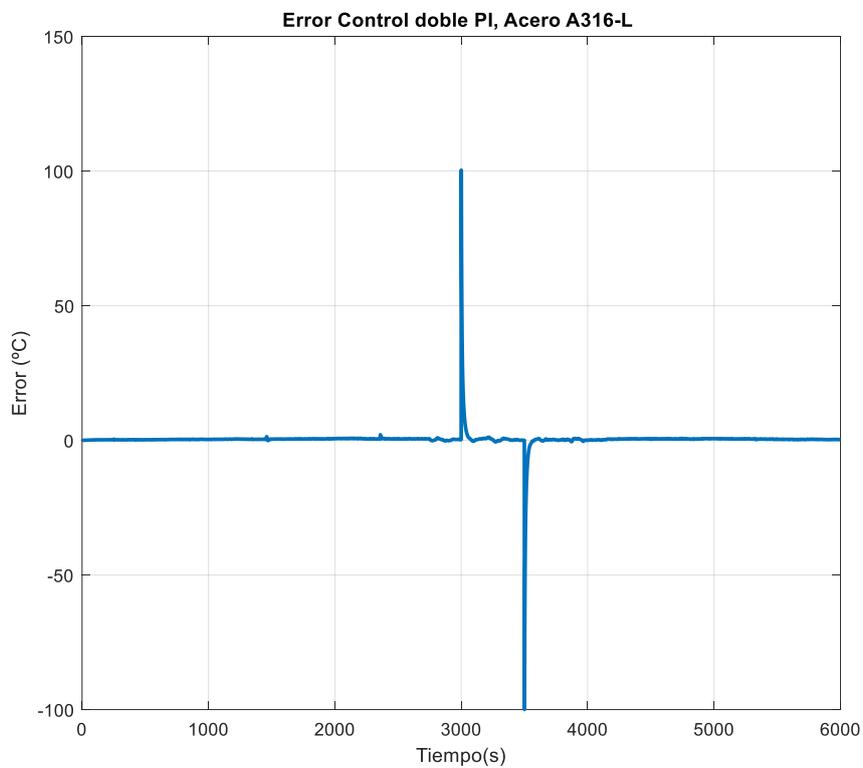


Figura 3.272. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. Conmutación de doble PI serie con PI, con antiwindup y control anticipativo. Apertura de la persiana y temperatura ambiente.

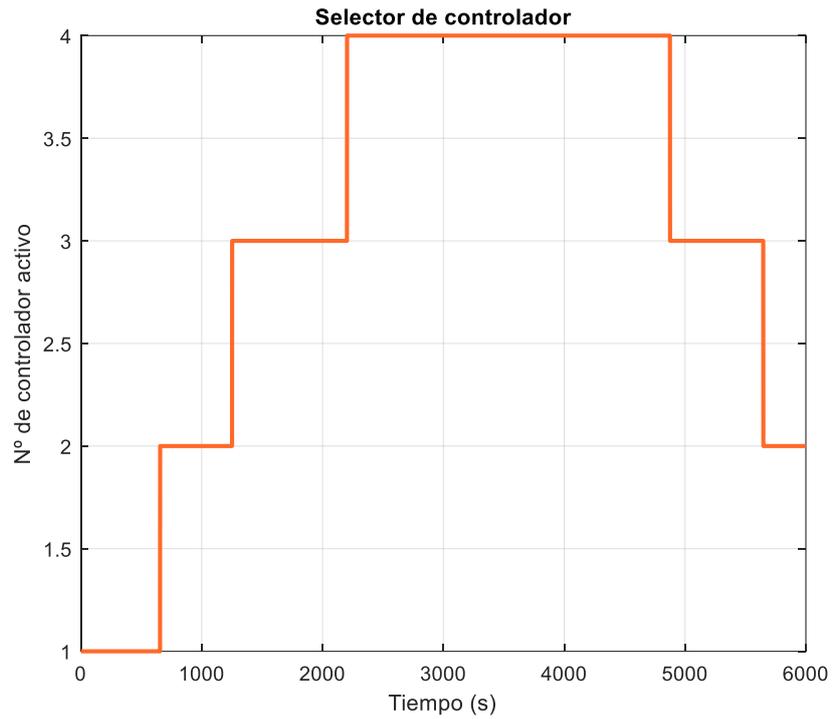


Figura 3.273. Ensayo (1) con la muestra de acero A316-L. Número de controlador ante rampa que está activo en función del rango de operación en el que se trabaja. No se incluye el cambio de control ante rampa a control ante escalón y viceversa, que se dan a los 2750 y 4250 segundos.

4 Conclusiones y líneas futuras

Tanto en la búsqueda bibliográfica como durante el desarrollo de este TFM se han podido extraer diversas conclusiones acerca del comportamiento de un horno solar y a las distintas maneras de modelarlo.

Una de las primeras conclusiones que pueden extraerse del presente trabajo es que el modelo no lineal que se utiliza se trata de un modelo simplificado incapaz de tener en cuenta todos los mecanismos internos de transferencia de calor y dinámicas asociadas a cada una de las muestras. Esto se ha podido comprobar cuando se han obtenido resultados de los parámetros de absorptividad, coeficiente de convección y emisividad mediante el algoritmo genético que no concordaban con los límites físicos de los propios parámetros. Sin embargo, esto último es a su vez una ventaja porque permite al modelo no lineal adaptarse a la muestra en cuestión (con información suficiente claro está), dado que posee tres grados de libertad que acumulan la incertidumbre del modelo respecto al sistema y puede llegar ajustarse a la pieza real, aunque esto suponga que los parámetros pierdan sentido físico en cierta medida (como ocurre con los modelos de caja gris como el utilizado).

Otra conclusión clara y evidente, es que el algoritmo genético utilizado en el presente trabajo (con los operadores de cruce, mutación y selección seleccionados) representa un método muy sencillo a la vez que potente para calibrar modelos dinámicos no lineales, ya que es capaz de encontrar las mejores soluciones de forma automática, solamente especificando el número de generaciones, la población inicial y el intervalo de búsqueda para cada parámetro. Este algoritmo es realmente útil a la hora de tratar con sistemas que se desconocen ciertas variables, donde se le podrían dar intervalos amplios con poblaciones iniciales grandes y acabar encontrando probablemente el mínimo de la función de adaptación o, en todo caso, al menos acotar el “radio de búsqueda”.

Sin embargo, respecto a la conclusión anterior también hay que añadir que este algoritmo presenta una carga computacional muy grande conforme mayor es la población inicial y el número de generaciones, por lo que al final dependerá de las intenciones del usuario del algoritmo.

Respecto al modelo no lineal del horno, se ha podido comprobar que es un proceso fuertemente no lineal, sobre todo a bajos valores de apertura de la persiana, donde además se ve fuertemente influenciado por la radiación solar en dicho rango de operación marcado por la apertura de la persiana. Además, se ha demostrado que los parámetros característicos de cada muestra de ensayo distinta influyen de una manera notable en la dinámica del modelo, obteniéndose modelos muy distintos de una muestra a otra. Es por tanto muy importante a la hora de trabajar con esta instalación el conocer las muestras de ensayo que se tratan, tanto su forma física como sus propiedades térmicas, ya que un buen ajuste de las mismas puede ser además determinante en el calibrado del modelo.

Las no linealidades que presenta esta instalación, como son la limitación de la velocidad de apertura de la persiana, la saturación asociada a los valores máximo y mínimo de apertura o las posiciones del *encoder* del motor, son también aspectos muy importantes que deben ser tratados. En este trabajo se ha implementado la técnica de *antiwindup*, que se ha demostrado realmente efectiva. Además, existen otras técnicas como las de

identificación de modelos de Hammerstein, que mediante algoritmos de la familia de mínimos cuadrados permiten obtener un modelo que tiene en cuenta de forma explícita estas no linealidades como parte del modelo. Este método se pensaba implementar también en este trabajo, pero debido a falta de tiempo dadas las horas dedicadas a otras tareas del trabajo, se ha decidido finalmente dejarlo para su desarrollo en líneas futuras.

Respecto a los resultados de control, se puede observar que el control para los cambios en la referencia en forma de escalón resulta muy efectivo, obteniéndose errores de seguimiento muy bajos y durante todo el rango de operación, aunque no sean perfectos ya que hay que tener en cuenta que se han asumido errores de modelado cuando se obtuvieron los modelos lineales. Sin embargo, el control PI diseñado para alcanzar un error nulo en las referencias en forma de escalón, no consigue un error nulo ante referencias en forma de rampa, siendo necesario aumentar la precisión para cierto tipo de ensayos y operaciones que se realizan en el horno solar. Para el seguimiento de referencias en forma de rampa sin error en estado estacionario se ha implementado una estrategia de control con un doble control PI interactivo incorporando mecanismo *antiwindup* y sin filtro en la referencia, puesto que de esta forma se obtienen resultados muy buenos en seguimiento de rampa, aunque en seguimiento de escalones sus prestaciones no sean tan buenas como las de un simple PI, dado que la presencia del doble integrador dificulta el control y tiende a provocar oscilaciones en la respuesta temporal. Por ello, en este trabajo se ha demostrado que, una combinación de ambos diseños para aplicaciones en el horno solar en las que se conoce previamente el perfil de ensayo puede ser realmente útil, puesto que unifica las bondades de ambos diseños.

Por último, comentar que para líneas futuras se podría ampliar este trabajo añadiendo más intervalos al rango de operación de las muestras estudiadas, para conseguir una mayor precisión en cuanto a los modelos lineales que se utilicen para cada uno de los intervalos.

Bibliografía

- [1] F. García-Martín, «Sistemas de control automático para una planta solar de tipo torre y un horno solar,» Proyecto fin de carrera. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla, 1996.
- [2] F. J. García-Martín, M. Berenguel, E. F. Camacho y F. R. Rubio, «Automatic control of a solar furnace,» Internal report GAR 1996/06, University of Seville, 1996.
- [3] M. Berenguel, E. Camacho, F. García-Martín y F. R. Rubio, «Temperature control of a solar furnace,» *IEEE Control System Magazine*, vol. 19, nº 1, pp. 8-25, 1999.
- [4] C. R. Houck, J. A. Joines y M. G. Kay, «A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation,» *Industrial Engineering, North Carolina State University*, nº 95, pp. 1-10, 1995.
- [5] E. F. Camacho, M. Berenguel, F. J. García-Martín y F. R. Rubio, «Adaptative control of a solar furnace for material testing,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 31, nº 22, pp. 163-169, 1998.
- [6] «National Institute of Standards and Technology,» U.S. Department of Commerce , [En línea]: última consulta el 25/07/2021. Available: <https://www.nist.gov/>.
- [7] X. Shan, C. M. Davies, T. Wangsdan, N. P. O'Dowd y K. M. Nikbin, «Thermo-mechanical modelling of a single-bead-on-plate weld using the finite element method,» *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 86, nº 1, pp. 110-121, Enero 2009.
- [8] J. Jensen, W. A. Tuttle, R. B. Stewart, H. Brechna y A. G. Prodell, «Brookhaven National Laboratory: Selected Cryogenic Data Notebook,» 1980. [En línea]: última consulta el 25/07/2021. Available: <https://www.bnl.gov/magnets/Staff/Gupta/cryogenic-data-handbook/Section8.pdf>.
- [9] D. Lacasa, M. Berenguel, L. Yebra y D. Martínez, «Copper sintering in a solar furnace through fuzzy control,» Proceedings of the 2006 CCA/CACSD/ISIC, Munich, Germany, 2006.
- [10] D. Lacasa, M. Berenguel, I. Cañadas y L. Yebra, «Modelling the thermal process of copper sintering in a solar furnace,» de *13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*, Seville, Spain, 2006.
- [11] E. F. Camacho, M. Berenguel, F. R. Rubio y D. Martínez, Control of Solar Energy Systems, Springer, 2012.

- [12] M. Pasamontes, J. D. Álvarez, J. L. Guzmán, J. M. Lemos y M. Berenguel, «A switching control strategy applied to a solar collector field,» *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 135-145, 2011.
- [13] «Página web del grupo de investigación: ARM-TEP197,» 2012. [En línea]. Available: <https://arm.ual.es/arm-group/>. [Último acceso: [18-sep-2019]].
- [14] «CHROMAE Project (DPI2017-85007-R),» [En línea]. Available: <http://www2.ual.es/chromae/>. [Último acceso: 25-sep-2019].
- [15] C. Pérez, *MATLAB y sus Aplicaciones en las Ciencias y la Ingeniería*, Madrid: Pearson Educación S.A., 2002.
- [16] K. Aström y T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, Segunda ed., Instrumental Society of America, 1995.
- [17] A. J. Chapman, *Transferencia de Calor*, 3ª ed., Madrid: Librería Editorial Bellisco, 1990.
- [18] M. Beschi, M. Berenguel, A. Visioli y L. Yebra, «Constrained temperature control of a solar furnace,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, nº 5, pp. 1263-1274, 2012.

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo el modelado y control de un horno solar, una instalación en la que se ensaya el comportamiento de distintos tipos de materiales cuando se someten a perfiles de altas temperaturas con el objetivo de analizar distintas características. Para ello se hace uso de un modelo no lineal basado en el intercambio de calor de la muestra, y que presenta ciertos parámetros que son desconocidos y que es necesario estimar para tener un modelo válido. Es por eso que, en el presente trabajo, se aplica un algoritmo genético capaz de buscar una estimación de dichos parámetros que mejor se ajustan a la dinámica deseada, y para lo que se utilizan cuatro tipos de muestras distintas de las que se poseen registros de datos de medidas de temperatura de la muestra, radiación solar, temperatura ambiente y apertura de la persiana, las cuatro entradas y salidas del horno que se utilizan para calibrar el modelo y validarlo.

Una de las peculiaridades que presenta este trabajo es la alta no linealidad que rige este proceso, que es muy pronunciada cuando se trabaja a bajos porcentajes de apertura de la persiana, la variable manipulable que regula la radiación entrante al horno. Debido a ello se estudian en el presente trabajo las dinámicas de los distintos tipos de piezas, dinámicas basadas en un modelo no lineal previamente calibrado con un algoritmo genético y validado, y para las cuales se obtienen modelos de primer orden en base a la propia linealización del modelo principal, que se evalúan con índices de funcionamiento. Además, se estudiarán diversas estructuras de control que permitan conseguir error nulo en régimen permanente frente a referencias en forma de rampa y referencias en forma de escalón, pues son perfiles habituales en los que se trabaja en este tipo de instalación.

This Final Master Project aims to model and control a solar furnace, an installation in which different types of pieces are heated to high temperatures in order to analyze their physical characteristics. To achieve this, a non-linear model is used based on the heat exchange of the sample which presents certain parameters that are unknown and that it is necessary to estimate in order to have a valid model of the process. That is why, in the present work, a genetic algorithm is applied capable of finding an estimate of the values of these unknown parameters that best fit the desired dynamics, and for which four different types of samples are used, of which there are records of data measured for sample temperature, solar radiation, ambient temperature and shutter opening, the four main inputs and outputs needed to calibrate and validate the model. One of the great peculiarities that this works presents is the high non-linearity that governs this process, which is very pronounced when working at low shutter opening percentages, the manipulable variable that regulates the radiation entering the furnace. Due to this fact, the dynamics of the different types of pieces are studied in the present work, dynamics based on a non-linear model previously calibrated and validated with a genetic algorithm, and for which first-order models are obtained based on the linearization of the main model, which are evaluated with performance indices. In addition, various control structures will be studied that allow zero error to be achieved in steady state compared to ramp-shaped references and step-shaped references, as these are the typical temperature profiles used in this facility.

