

**MODELADO Y CONTROL MULTIVARIABLE
DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN UN INVERNADERO**



Autor: Cristina Sánchez Pérez

Directores: José Luis Guzmán Sánchez y Jorge Antonio Sánchez Molina

19 de septiembre de 2014

*A todos los que me han ayudado
a realizar este proyecto.*

Índice General

INTERÉS Y OBJETIVOS	17
1.1 MOTIVACIÓN DEL DESARROLLO DEL PROYECTO.	17
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.	18
1.3 CONTEXTO DEL PROYECTO.	18
1.4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.	19
1.5 PLANIFICACIÓN TEMPORAL.	24
1.6 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.	25
CONTROL DE TEMPERATURA Y HUMEDAD	27
2.1 PROBLEMA DEL CONTROL CLIMÁTICO.	27
2.2 PROBLEMA GENERAL DEL CONTROL DE LA TEMPERATURA.	28
2.2.1 Problema de la temperatura utilizando ventilación natural.	30
2.3 PROBLEMA GENERAL DEL CONTROL DE LA HUMEDAD RELATIVA.	31
2.3.1 Efecto de la ventilación sobre la humedad relativa.	31
MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 DESCRIPCIÓN DEL INVERNADERO.	33
3.1.1 Localización y descripción del invernadero.	33
3.1.2 Sistemas de actuación sobre el clima instalados.	34
3.1.2.1 Ventilación natural.....	34
3.1.2.2 Sistema de calefacción.....	35
3.1.2.3 Malla de sombreo.....	37
3.2 HERRAMIENTAS SOFTWARE UTILIZADAS.	38
3.2.1 MATLAB.	38
3.2.1.1 Simulink.....	38
3.2.1.2 Herramienta de identificación de sistemas.....	39
3.3 DESCRIPCIÓN Y TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL.	39
3.3.1 Elementos que forman un sistema de control.	41
3.3.2 Tipos de variables.	43
3.3.3 Clasificación de los sistemas de control.	44
3.3.4 Características de los sistemas de control.	46
3.4 TÉCNICAS DE MODELADO.	49
3.4.1 Modelado teórico.	49
3.4.1.1 Modelo simplificado de la temperatura del aire.	49
3.4.1.2 Modelo simplificado de la humedad del aire.....	53
3.4.2 Método de ajuste por la curva de reacción.	54
3.5 TÉCNICAS DE CONTROL.	56
3.5.1 Control selectivo.	56
3.5.1.1 Control override.....	56
3.5.2 Control PID.	57
3.5.3 Compensación de perturbaciones. Control anticipativo.	58
RESULTADOS OBTENIDOS	59
4.1 BATERÍA DE ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS.	59
4.1.1 Ensayos realizados para la obtención de los modelos que afectan a la temperatura.	60
4.1.1.1 Obtención del modelo principal del sistema.....	60

4.1.1.2	<i>Obtención de los modelos de las perturbaciones.</i>	66
4.1.1.2.1	<i>Obtención del modelo de la radiación solar.</i>	66
4.1.1.2.2	<i>Obtención del modelo de la temperatura exterior.</i>	72
4.1.1.2.3	<i>Obtención del modelo de la velocidad del viento.</i>	78
4.1.1.2.4	<i>Obtención del modelo de la humedad absoluta exterior.</i>	83
4.1.1.3	<i>Validación de los modelos de temperatura.</i>	89
4.1.1.3.1	<i>Modelo de temperatura con entrada de ventilación.</i>	89
4.1.1.3.2	<i>Modelo de temperatura con entrada de radiación solar.</i>	91
4.1.1.3.3	<i>Modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior.</i>	93
4.1.1.3.4	<i>Modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento.</i>	95
4.1.1.3.5	<i>Modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior.</i>	97
4.1.1.3.6	<i>Validación del modelo de temperatura completo.</i>	99
4.1.2	<i>Ensayos realizados para la obtención de los modelos que afectan a la humedad relativa.</i>	99
4.1.2.1	<i>Obtención del modelo principal del sistema.</i>	99
4.1.2.2	<i>Obtención de los modelos de las perturbaciones.</i>	105
4.1.2.2.1	<i>Obtención del modelo de la radiación solar.</i>	105
4.1.2.2.2	<i>Obtención del modelo de la temperatura exterior.</i>	111
4.1.2.2.3	<i>Obtención del modelo de la velocidad del viento.</i>	116
4.1.2.2.4	<i>Obtención del modelo de la humedad absoluta exterior.</i>	122
4.1.2.3	<i>Validación de los modelos de humedad.</i>	127
4.1.2.3.1	<i>Modelo de humedad con entrada de ventilación.</i>	127
4.1.2.3.2	<i>Modelo de humedad con entrada de radiación solar.</i>	129
4.1.2.3.3	<i>Modelo de humedad con entrada de temperatura exterior.</i>	131
4.1.2.3.4	<i>Modelo de humedad con entrada de velocidad del viento.</i>	133
4.1.2.3.5	<i>Modelo de humedad con entrada de humedad absoluta exterior.</i>	135
4.1.2.3.6	<i>Validación del modelo de humedad relativa completo.</i>	137
4.2	BATERÍA DE ENSAYOS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL.	137
4.2.1	<i>Control de la temperatura.</i>	138
4.2.1.1	<i>Control anticipativo de las perturbaciones del sistema.</i>	141
4.2.2	<i>Control de la humedad relativa.</i>	144
4.2.2.1	<i>Control anticipativo de las perturbaciones del sistema.</i>	146
4.2.3	<i>Control selectivo.</i>	149
4.2.1	<i>Comparación de controladores.</i>	154
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		157
BIBLIOGRAFÍA		161

Índice de figuras

FIGURA 1.1 MODELO FINAL DE TEMPERATURA	19
FIGURA 1.2 MODELO FINAL DE HUMEDAD RELATIVA.....	19
FIGURA 1.3 CONTROL DE TEMPERATURA	20
FIGURA 1.4 SEÑAL DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	20
FIGURA 1.5 CONTROL DE TEMPERATURA EN EL DÍA 1.....	21
FIGURA 1.6 CONTROL DE TEMPERATURA EN EL DÍA 3.....	21
FIGURA 1.7 CONTROL DE LA HUMEDAD	21
FIGURA 1.8 SEÑAL DE CONTROL DE LA HUMEDAD.....	21
FIGURA 1.9 CONTROL DE HUMEDAD EN EL DÍA 3.....	22
FIGURA 1.10 CONTROL DE HUMEDAD EN EL DÍA 1.....	22
FIGURA 1.11 CONTROL SELECTIVO.....	23
FIGURA 1.12 CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL DÍA 4	23
FIGURA 1.13 CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL DÍA 2	23
FIGURA 1.14 SEÑAL DE CONTROL DEL CONTROL SELECTIVO.....	23
FIGURA 1.15 CONTROL DE HUMEDAD PARA EL DÍA 3	24
FIGURA 1.16 CONTROL DE HUMEDAD PARA EL DÍA 8	24
FIGURA 2.1 ESQUEMA DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROBLEMA DEL CONTROL CLIMÁTICO.....	28
FIGURA 2.2 CONDENSACIÓN EN LOS CUERPOS SÓLIDOS DEL SISTEMA INVERNADERO	29
FIGURA 3.1 VISTA GENERAL DEL INVERNADERO.....	33
FIGURA 3.2 VENTILACIÓN CENITAL.....	34
FIGURA 3.3 VENTILACIÓN LATERAL	34
FIGURA 3.4 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	37
FIGURA 3.5 MECANISMO DE EXTENSIÓN DE LA MALLA DE SOMBREO	38
FIGURA 3.6 PROCESO.....	39
FIGURA 3.7 SISTEMA DE CONTROL EN BUCLE ABIERTO.....	40
FIGURA 3.8 SISTEMA DE CONTROL EN BUCLE CERRADO	40
FIGURA 3.9 SISTEMA DE CONTROL EN BUCLE ABIERTO.....	41
FIGURA 3.10 COMPONENTES DE UN SENSOR.....	42
FIGURA 3.11 VARIABLES EN UN SISTEMA EN BUCLE CERRADO.....	43
FIGURA 3.12 RESPUESTA DE UN SISTEMA ESTABLE.....	47
FIGURA 3.13 RESPUESTA DE UN SISTEMA INESTABLE.....	47
FIGURA 3.14 RESPUESTA DE UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN.....	49
FIGURA 3.15 FLUJOS DE ENERGÍA Y VAPOR DE AGUA EN EL INVERNADERO	50
FIGURA 3.16 FLUJOS DE VAPOR DE AGUA EN EL INVERNADERO	53
FIGURA 3.17 LAZO DE CONTROL ABIERTO POR EL MÉTODO DE COHEN & COON	54
FIGURA 3.18 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CON EL MÉTODO DE LA CURVA DE REACCIÓN	55
FIGURA 3.19 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL OVERRIDE	56
FIGURA 3.20 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL ANTICIPATIVO	58
FIGURA 4.1 RADIACIÓN GLOBAL EN EL INVERNADERO	59
FIGURA 4.2 TEMPERATURA EXTERIOR AL INVERNADERO	59
FIGURA 4.3 VELOCIDAD DEL VIENTO	59
FIGURA 4.4 HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR AL INVERNADERO.....	59
FIGURA 4.5 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 8.....	61
FIGURA 4.6 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 9.....	61
FIGURA 4.7 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 10.....	62

FIGURA 4.8 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 11.....	63
FIGURA 4.9 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 12.....	63
FIGURA 4.10 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 13.....	64
FIGURA 4.11 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 8	67
FIGURA 4.12 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 9	67
FIGURA 4.13 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 10	68
FIGURA 4.14 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 11	69
FIGURA 4.15 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 12	69
FIGURA 4.16 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 13	70
FIGURA 4.17 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 8.....	72
FIGURA 4.18 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 9.....	73
FIGURA 4.19 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 10.....	74
FIGURA 4.20 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 11.....	74
FIGURA 4.21 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 12.....	75
FIGURA 4.22 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 13.....	76
FIGURA 4.23 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 8.....	78
FIGURA 4.24 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 9.....	79
FIGURA 4.25 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 10.....	79
FIGURA 4.26 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 11.....	80
FIGURA 4.27 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 12.....	81
FIGURA 4.28 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 13.....	81
FIGURA 4.29 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 8.....	84
FIGURA 4.30 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 9.....	84
FIGURA 4.31 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 10.....	85
FIGURA 4.32 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 11.....	86
FIGURA 4.33 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 12.....	86
FIGURA 4.34 ENSAYOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 13.....	87
FIGURA 4.35 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 1	89
FIGURA 4.36 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 2	89
FIGURA 4.37 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 3	90
FIGURA 4.38 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 4.....	90
FIGURA 4.39 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 5	90
FIGURA 4.40 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 6.....	90
FIGURA 4.41 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 7.....	90
FIGURA 4.42 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 1	91
FIGURA 4.43 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 2	91
FIGURA 4.44 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 3	92
FIGURA 4.45 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 4	92
FIGURA 4.46 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 5	92
FIGURA 4.47 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 6	92
FIGURA 4.48 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 7	92
FIGURA 4.49 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 1	93
FIGURA 4.50 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 2	93
FIGURA 4.51 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 3	93
FIGURA 4.52 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 4.....	93
FIGURA 4.53 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 5.....	94
FIGURA 4.54 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 6.....	94
FIGURA 4.55 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 7.....	94

FIGURA 4.56 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 1.....	95
FIGURA 4.57 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 2.....	95
FIGURA 4.58 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 3.....	95
FIGURA 4.59 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 4.....	95
FIGURA 4.60 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 5.....	96
FIGURA 4.61 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 6.....	96
FIGURA 4.62 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 7.....	96
FIGURA 4.63 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 1.	97
FIGURA 4.64 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 2.	97
FIGURA 4.65 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 3.	97
FIGURA 4.66 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 4.	97
FIGURA 4.67 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 5.	98
FIGURA 4.68 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 6.	98
FIGURA 4.69 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 7.	98
FIGURA 4.70 MODELO COMPLETO DE TEMPERATURA	99
FIGURA 4.71 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 8	100
FIGURA 4.72 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 9	101
FIGURA 4.73 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 10	101
FIGURA 4.74 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 11	102
FIGURA 4.75 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 12	103
FIGURA 4.76 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 13	103
FIGURA 4.77 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 8.....	106
FIGURA 4.78 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 9.....	106
FIGURA 4.79 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 10	107
FIGURA 4.80 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 11	108
FIGURA 4.81 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 12	108
FIGURA 4.82 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 13	109
FIGURA 4.83 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 8	111
FIGURA 4.84 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 9	112
FIGURA 4.85 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 10	113
FIGURA 4.86 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 11	113
FIGURA 4.87 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 12	114
FIGURA 4.88 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 13	115
FIGURA 4.89 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 8	117
FIGURA 4.90 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 9	118
FIGURA 4.91 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 10.....	118
FIGURA 4.92 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 11	119
FIGURA 4.93 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 12	120
FIGURA 4.94 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 13	120
FIGURA 4.95 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 8	122
FIGURA 4.96 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 9	123
FIGURA 4.97 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 10	123
FIGURA 4.98 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 11	124
FIGURA 4.99 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 12	125
FIGURA 4.100 ENSAYOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 13	125
FIGURA 4.101 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 1	128
FIGURA 4.102 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 2	128
FIGURA 4.103 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 3	128

FIGURA 4.104 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 4	128
FIGURA 4.105 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 5	128
FIGURA 4.106 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 6	128
FIGURA 4.107 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 7	129
FIGURA 4.108 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 1.....	130
FIGURA 4.109 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 2.....	130
FIGURA 4.110 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 3.....	130
FIGURA 4.111 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 4.....	130
FIGURA 4.112 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 5.....	130
FIGURA 4.113 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 6.....	130
FIGURA 4.114 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 7.....	131
FIGURA 4.115 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 1	132
FIGURA 4.116 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 2	132
FIGURA 4.117 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 3	132
FIGURA 4.118 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 4	132
FIGURA 4.119 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 5	132
FIGURA 4.120 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 6	132
FIGURA 4.121 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 7	133
FIGURA 4.122 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 1	134
FIGURA 4.123 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 2	134
FIGURA 4.124 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 3	134
FIGURA 4.125 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 4	134
FIGURA 4.126 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 5	134
FIGURA 4.127 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 6	134
FIGURA 4.128 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 7	135
FIGURA 4.129 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD EXTERIOR. Día 1	135
FIGURA 4.130 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD EXTERIOR. Día 2	135
FIGURA 4.131 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD EXTERIOR. Día 3	136
FIGURA 4.132 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD EXTERIOR. Día 4	136
FIGURA 4.133 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD EXTERIOR. Día 5	136
FIGURA 4.134 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD EXTERIOR. Día 6	136
FIGURA 4.135 VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD EXTERIOR. Día 7	136
FIGURA 4.136 MODELO FINAL DE HUMEDAD RELATIVA.....	137
FIGURA 4.137 ESQUEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	139
FIGURA 4.138 ESQUEMA ANTI-WINDUP.....	139
FIGURA 4.139 CONTROL DE TEMPERATURA	140
FIGURA 4.140 CONTROL DE TEMPERATURA AMPLIADO	140
FIGURA 4.141 SEÑAL DE CONTROL	140
FIGURA 4.142 ESQUEMA DE TEMPERATURA CON FEEDFORWARD	142
FIGURA 4.143 CONTROL DE TEMPERATURA CON FEEDFORWARD	142
FIGURA 4.144 CONTROL DE TEMPERATURA AMPLIADO	143

FIGURA 4.145 CONTROL DE TEMPERATURA EN EL DÍA 3	143
FIGURA 4.146 CONTROL DE TEMPERATURA EN EL DÍA 1	143
FIGURA 4.147 SEÑAL DE CONTROL CON FEEDFORWARD	143
FIGURA 4.148 ESQUEMA DE CONTROL DE HUMEDAD RELATIVA.....	144
FIGURA 4.149 CONTROL DE HUMEDAD	145
FIGURA 4.150 SEÑAL DE CONTROL	145
FIGURA 4.151 CONTROL DE HUMEDAD AMPLIADO.....	145
FIGURA 4.152 ESQUEMA DE CONTROL DE HUMEDAD CON FEEDFORWARD	147
FIGURA 4.153 CONTROL DE HUMEDAD CON FEEDFORWARD	147
FIGURA 4.154 CONTROL DE HUMEDAD AMPLIADO.....	148
FIGURA 4.155 CONTROL DE HUMEDAD DEL DÍA 1	148
FIGURA 4.156 CONTROL DE HUMEDAD DEL DÍA 3	148
FIGURA 4.157 SEÑAL DE CONTROL CON FEEDFORWARD	148
FIGURA 4.158 ESQUEMA DE CONTROL SELECTIVO	149
FIGURA 4.159 ESQUEMA DE TRANSFERENCIA SIN SALTOS	150
FIGURA 4.160 CONTROL DE TEMPERATURA	150
FIGURA 4.161 CONTROL DE TEMPERATURA AMPLIADO	151
FIGURA 4.162 CONTROL DE HUMEDAD	151
FIGURA 4.163 CONTROL DE HUMEDAD AMPLIADO.....	151
FIGURA 4.164 SEÑALES DE CONTROL	152
FIGURA 4.165 COMPARACIÓN DE RANGOS EN LA TEMPERATURA.....	153
FIGURA 4.166 AMPLIACIÓN DE LA COMPARACIÓN DE RANGOS EN LA TEMPERATURA	153
FIGURA 4.167 COMPARACIÓN DE RANGOS EN LA HUMEDAD RELATIVA	153
FIGURA 4.168 AMPLIACIÓN DE LA COMPARACIÓN DE RANGOS EN LA HUMEDAD RELATIVA.....	154
FIGURA 4.169 COMPARACIÓN DE CONTROLADORES PARA TEMPERATURA.....	154
FIGURA 4.170 CONTROL DE TEMPERATURA EN LOS DÍAS 10 Y 11	155
FIGURA 4.171 COMPARACIÓN DE CONTROLADORES PARA HUMEDAD.....	155
FIGURA 4.172 CONTROL DE HUMEDAD EN LOS DÍAS 10 Y 11	155

Índice de tablas

TABLA 1.1 PLANIFICACIÓN TEMPORAL	25
TABLA 4.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA VENTILACIÓN	60
TABLA 4.2 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. DÍA 8	61
TABLA 4.3 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. DÍA 9	62
TABLA 4.4 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. DÍA 10	62
TABLA 4.5 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. DÍA 11	63
TABLA 4.6 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. DÍA 12	64
TABLA 4.7 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. DÍA 13	64
TABLA 4.8 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN	65
TABLA 4.9 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN	65
TABLA 4.10 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN	65
TABLA 4.11 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA RADIACIÓN SOLAR	66
TABLA 4.12 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. DÍA 8.....	67
TABLA 4.13 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. DÍA 9.....	68
TABLA 4.14 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. DÍA 10.....	68
TABLA 4.15 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. DÍA 11.....	69
TABLA 4.16 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. DÍA 12.....	70
TABLA 4.17 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. DÍA 13.....	70
TABLA 4.18 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR	71
TABLA 4.19 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR.....	71
TABLA 4.20 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR	71
TABLA 4.21 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA TEMPERATURA EXTERIOR.....	72
TABLA 4.22 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. DÍA 8	73
TABLA 4.23 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. DÍA 9	73
TABLA 4.24 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. DÍA 10	74
TABLA 4.25 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. DÍA 11	75
TABLA 4.26 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. DÍA 12	75
TABLA 4.27 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. DÍA 13	76
TABLA 4.28 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR	76
TABLA 4.29 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR	77
TABLA 4.30 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR.....	77
TABLA 4.31 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO.....	78
TABLA 4.32 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. DÍA 8	78
TABLA 4.33 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. DÍA 9	79
TABLA 4.34 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. DÍA 10	80
TABLA 4.35 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. DÍA 11	80
TABLA 4.36 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. DÍA 12	81
TABLA 4.37 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. DÍA 13	82
TABLA 4.38 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO	82
TABLA 4.39 RESUMEN DE LAS CONSTANTES DE TIEMPO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO .	82
TABLA 4.40 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO.....	82
TABLA 4.41 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR.....	83
TABLA 4.42 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 8	84
TABLA 4.43 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 9	85
TABLA 4.44 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 10	85

TABLA 4.45 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 11	86
TABLA 4.46 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 12	87
TABLA 4.47 RESULTADOS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. Día 13	87
TABLA 4.48 RESUMEN DE LAS GANANCIAS ESTÁTICAS DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR	88
TABLA 4.49 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR	88
TABLA 4.50 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE TEMPERATURA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR	88
TABLA 4.51 AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS DE LA TEMPERATURA A CON ENTRADA DE VENTILACIÓN	90
TABLA 4.52 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA VENTILACIÓN	100
TABLA 4.53 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 8	100
TABLA 4.54 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 9	101
TABLA 4.55 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 10	102
TABLA 4.56 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 11	102
TABLA 4.57 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 12	103
TABLA 4.58 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN. Día 13	104
TABLA 4.59 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN	104
TABLA 4.60 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN.....	104
TABLA 4.61 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VENTILACIÓN	104
TABLA 4.62 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA RADIACIÓN SOLAR	105
TABLA 4.63 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 8.....	106
TABLA 4.64 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 9.....	107
TABLA 4.65 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 10.....	107
TABLA 4.66 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 11.....	108
TABLA 4.67 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 12.....	109
TABLA 4.68 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR. Día 13.....	109
TABLA 4.69 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR.....	110
TABLA 4.70 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR	110
TABLA 4.71 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE RADIACIÓN SOLAR.....	110
TABLA 4.72 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA TEMPERATURA EXTERIOR.....	111
TABLA 4.73 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 8.....	112
TABLA 4.74 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 9.....	112
TABLA 4.75 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 10.....	113
TABLA 4.76 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 11.....	114
TABLA 4.77 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 12.....	114
TABLA 4.78 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR. Día 13.....	115
TABLA 4.79 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR	115
TABLA 4.80 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR	116
TABLA 4.81 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE TEMPERATURA EXTERIOR	116
TABLA 4.82 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO.....	117
TABLA 4.83 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 8.....	117
TABLA 4.84 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 9.....	118
TABLA 4.85 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 10.....	119
TABLA 4.86 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 11.....	119
TABLA 4.87 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. Día 12.....	120

TABLA 4.88 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO. DÍA 13.....	121
TABLA 4.89 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO	121
TABLA 4.90 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO	121
TABLA 4.91 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETARDO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO	121
TABLA 4.92 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESCALONES PARA LA HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR.....	122
TABLA 4.93 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 8	122
TABLA 4.94 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 9	123
TABLA 4.95 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 10	124
TABLA 4.96 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 11	124
TABLA 4.97 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 12	125
TABLA 4.98 RESULTADOS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR. DÍA 13	126
TABLA 4.99 RESUMEN DE GANANCIAS ESTÁTICAS DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR.....	126
TABLA 4.100 RESUMEN DE CONSTANTES DE TIEMPO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR.....	126
TABLA 4.101 RESUMEN DE TIEMPOS DE RETADO DE HUMEDAD RELATIVA CON ENTRADA DE HUMEDAD ABSOLUTA EXTERIOR.....	126
TABLA 4.102 AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS DE LA TEMPERATURA A CON ENTRADA DE VENTILACIÓN	129

Capítulo 1:

Interés y objetivos

1.1 Motivación del desarrollo del proyecto.

Desde 1980, a unos 30 kilómetros de Almería, en el denominado “mar de plástico”, se ha desarrollado la mayor concentración de invernaderos del mundo, llegando a cubrir unas 28.576 hectáreas en la campaña 2012/2013. Más de la mitad de la demanda europea de frutas y verduras se satisface con los cultivos de invernaderos almerienses. Son tan exitosos que han inundado completamente pequeños pueblos de la zona.

En la actualidad, la agricultura tiende a ser cada vez más productiva debido a exigencias de calidad, cantidad y precio. Es por esto que se está realizando un gran esfuerzo tratando de hacer llegar la tecnología a la cadena agrícola [1, 2], mejorando la producción bajo invernadero y su posterior comercialización [3].

El crecimiento del cultivo se considera el aspecto más crítico y clave en el cultivo bajo invernadero, donde se determinará la calidad y cantidad de la producción, siendo así necesario realizar los mayores esfuerzos en esta etapa, a fin de mejorar tanto la cantidad como la calidad. Debido a que el crecimiento de un cultivo se encuentra fundamentalmente determinado por las variables climáticas del entorno en el que se encuentra, por el adecuado suministro de agua y nutrientes, y por el control oportuno de plagas y enfermedades, controlando estas variables se podrá controlar en gran medida su crecimiento. Por esta razón, un invernadero es ideal para cultivar, pues se pueden manejar estas variables para alcanzar un crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas.

La idea de este proyecto es controlar las variables climáticas del invernadero. El problema surge al intentar controlar conjuntamente la temperatura y la humedad relativa con una única entrada, la ventilación del invernadero. Además, existe un alto grado de correlación entre las variables a controlar, de forma que la modificación del valor de una de ellas conlleva la variación de la otra. Al utilizar el mismo sistema de actuación (ventilación), el control de una de ellas puede provocar que la otra presente un comportamiento no deseado, fuera de los límites permitidos. Todos estos hechos llevan a probar con técnicas de control multivariable, basados en sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), en los que una o varias entradas afectan a una o varias salidas, y tiene como principal objetivo minimizar la interacción que causan unas variables a otras [4].

1.2 Objetivos del proyecto.

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un sistema que permita controlar la temperatura y la humedad en un invernadero a partir de la ventilación como única variable de control y teniendo en cuenta posibles perturbaciones que puedan afectar al sistema, como la radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura exterior o la humedad absoluta exterior.

Para llevar a cabo esta tarea es necesario solventar una serie de objetivos secundarios:

1. Elaboración de modelos que describan correctamente las relaciones entre las variables de salida (temperatura y humedad en el invernadero) y la de entrada (ventilación).
2. Análisis de la interacción entre variables y selección de las estructuras de control apropiadas.
3. Diseño e implementación de un sistema de control multivariable a partir de los modelos obtenidos, que permita controlar correctamente las salidas del sistema evitando, en la medida de lo posible, las perturbaciones que puedan afectar al invernadero y las interacciones entre las variables.

1.3 Contexto del proyecto.

En España, a finales de la década de los 70, se produjo una proliferación del cultivo en invernadero, principalmente debido a las condiciones climáticas de la costa mediterránea. Las provincias en las que más se acentúan estas áreas de proliferación son Alicante, Murcia, Almería y Granada, siendo la más destacada Almería, donde casi toda su superficie de costa está recubierta de invernaderos.

La agricultura bajo invernadero es un tipo de agricultura protegida que supuso un gran cambio en la agricultura tradicional. Entre las principales ventajas del cultivo bajo invernadero se encuentra: una mayor intensificación de la producción, aumento de los rendimientos de la producción, disminución del riesgo de la producción, uso más eficiente de insumos, mayor control de plagas y enfermedades, producción de cultivos de alta calidad y la posibilidad de cultivar durante todo el año.

Todos los cultivos utilizan la radiación solar, la concentración de CO_2 del aire que los rodea, agua y nutrientes para producir biomasa (raíces, tallos, hojas y frutos) mediante el proceso de fotosíntesis [2].

En un invernadero, el control de la temperatura se realiza mediante el intercambio convectivo de aire entre el exterior y el interior del invernadero (exterior normalmente más frío) [2], que se produce a través de las ventanas. Esta ventilación natural consiste en un conjunto de ventanas laterales que normalmente recorren todo el perímetro del invernadero, ventanas cenitales situadas en la cubierta, o bien, una combinación de ambas. Una vez abiertas es cuando se produce ese intercambio de aire entre el interior y exterior del invernadero debido a la distribución de presiones distintas en la superficie de la estructura causadas por el viento

exterior y a la diferencia de temperatura entre los dos volúmenes de aire (interior y exterior) [1].

En este proyecto se tratará de diseñar un sistema de control para el Invernadero instalado en la Estación Experimental de la fundación Cajamar “Las Palmerillas” basado en el control multivariable mediante controladores PID y el uso de desacopladores que permita controlar las principales variables que definen el crecimiento de los cultivos en el invernadero (temperatura y humedad), a partir de una única variable de entrada, la ventilación (sistema SIMO, una entrada y múltiples salidas), tratando de minimizar las posibles perturbaciones que afecten al invernadero.

1.4 Resumen de los resultados obtenidos.

Con el objetivo de realizar el control de la temperatura y la humedad relativa de un invernadero, se han realizado ensayos para obtener modelos lineales que describan la dinámica de las variables principales del invernadero y poder, a partir de estos, desarrollar una estrategia que permita controlar el sistema. Los ensayos han sido realizados en un conjunto de seis días y validados en siete días diferentes.

Al utilizar modelos lineales el ajuste que se obtendrá no será del 100%, sin embargo, el objetivo de estos modelos es con fines de control y por ello no se precisa un ajuste exhaustivo de los datos, ya que la realimentación compensará los pequeños errores de modelado.

Los resultados obtenidos del modelado de la temperatura y la humedad relativa se muestran en las figuras 1.1 y 1.2, respectivamente:

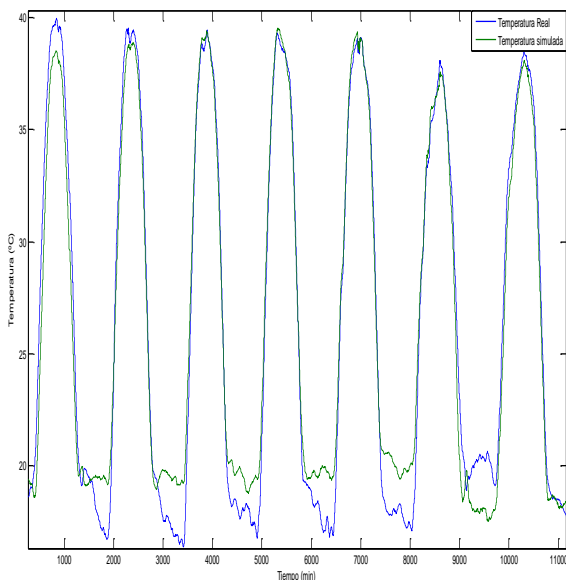


Figura 1.1 Modelo final de temperatura

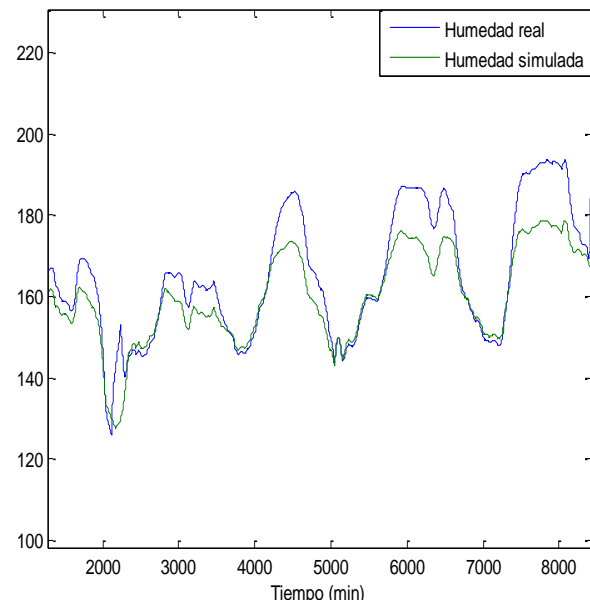


Figura 1.2 Modelo final de humedad relativa

Estos resultados corresponden a la suma del modelo principal del sistema y todos los modelos de las perturbaciones estudiadas, explicado con más detalle en el capítulo 4.

La primera gráfica representa una comparación entre la temperatura real (color azul) y la temperatura simulada a partir de los modelos obtenidos (color verde). Se puede apreciar que el modelo obtenido se ajusta correctamente a la dinámica real de la temperatura en las horas de máxima radiación solar. Esta es la zona que nos interesa que se ajuste correctamente, ya que será en esta zona donde actúe el controlador. Las zonas de menor radiación solar, correspondientes a la noche, son las que peor se ajustan. Sin embargo, este problema no es de interés, ya que solo se pretende controlar la temperatura durante las horas de mayor radiación.

La segunda gráfica compara la humedad relativa real (color azul) y la humedad relativa simulada (color verde). Se puede apreciar que el modelo real tiene más ganancia que el simulado. Esto se debe principalmente a la dinámica no lineal del sistema. Si se aumentase la ganancia para ajustar estos picos, la más leve variación en alguna de las perturbaciones podría aumentar demasiado la humedad relativa. El modelado de la humedad es bastante complejo. A pesar de esto, los resultados son bastante buenos.

A partir de estos modelos se han llevado a cabo tres estrategias de control:

- Control de temperatura.
- Control de humedad relativa.
- Control selectivo de temperatura y humedad.

Las dos primeras estrategias de control se han analizado con y sin control por adelantado, para comprobar el efecto que produce sobre las perturbaciones. A continuación se muestra una comparación del control de temperatura y humedad relativa con control por adelantado y sin este.

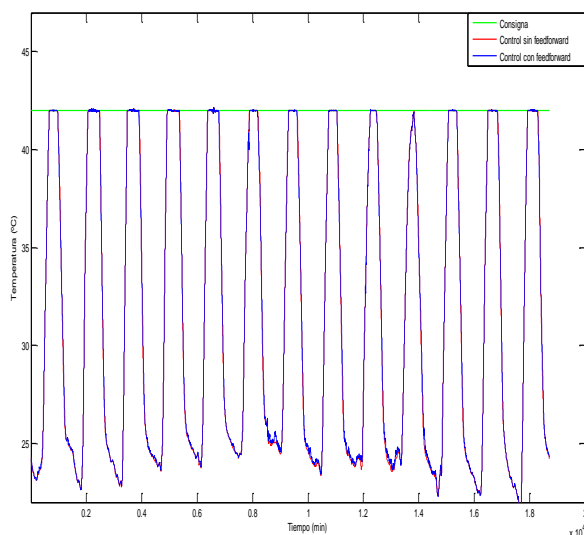


Figura 1.3 Control de temperatura

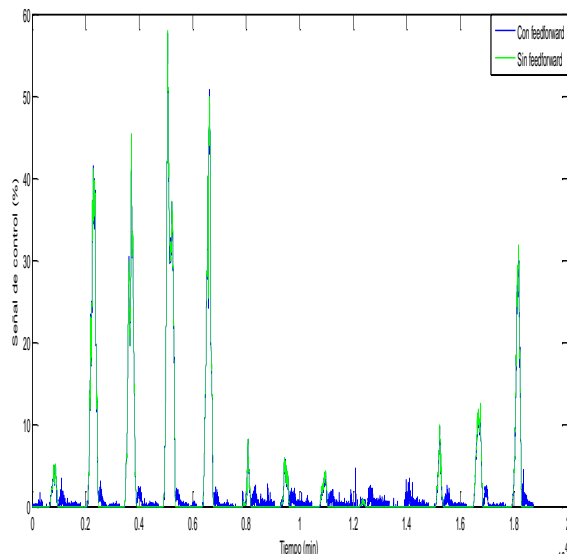


Figura 1.4 Señal de control de temperatura

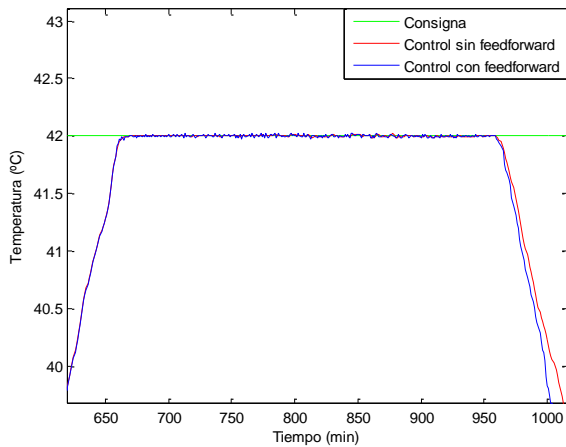


Figura 1.5 Control de temperatura en el día 1.

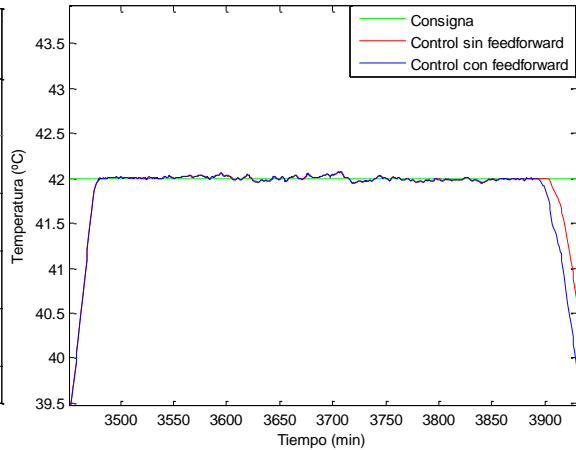


Figura 1.6 Control de temperatura en el día 3

La figura 1.3 representa la temperatura con un controlador PI (color rojo), la temperatura con un controlador PI y control anticipativo (color azul) y la consigna establecida en 42 °C (color verde). Aunque en la gráfica no se aprecia demasiado bien, el uso de feedforward mejora la respuesta respecto a la consigna aproximadamente en un 0.1%.

La figura 1.4 representa las señales de control. Aquí se puede apreciar como a la señal del controlador PI se le suma el efecto de las perturbaciones, de manera que cuando llega una perturbación, el controlador tiene información sobre esta y actúa en consecuencia.

Además, se añaden dos gráficas (figuras 1.5 y 1.6) de la temperatura ampliada en torno a la consigna, para los días 1 y 3, donde se puede ver que la temperatura aumenta durante el día siguiendo su dinámica natural, hasta que llega a la consigna (42 °C), donde el controlador hace que se mantenga, hasta que vuelve a disminuir. Se puede apreciar cierto ruido que no ha podido ser eliminado mediante el uso del control anticipativo. Esto se debe a que los modelos no son perfectos y no consiguen eliminar completamente el efecto de las perturbaciones.

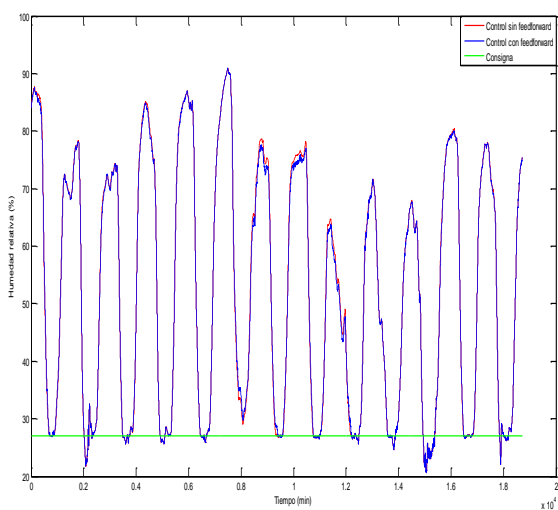


Figura 1.7 Control de la humedad

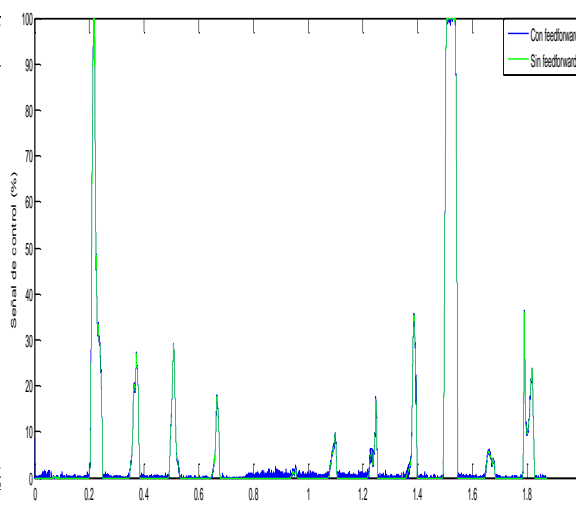


Figura 1.8 Señal de control de la humedad

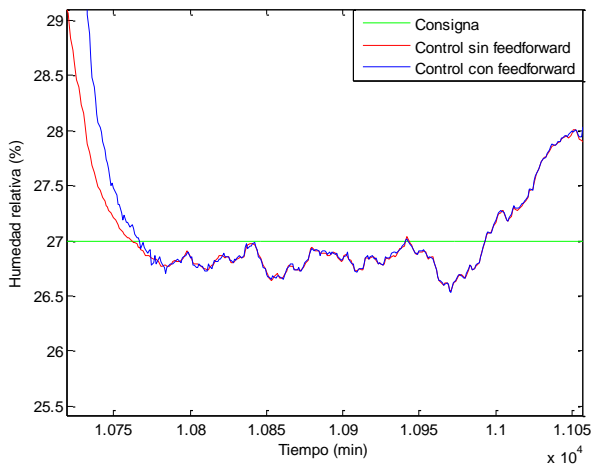


Figura 1.9 Control de humedad en el día 1

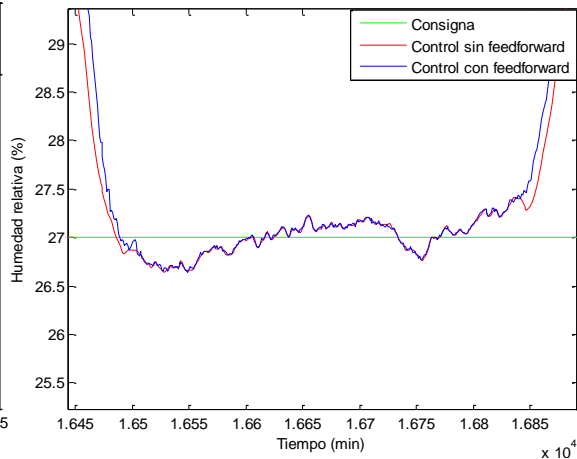


Figura 1.10 Control de humedad en el día 3

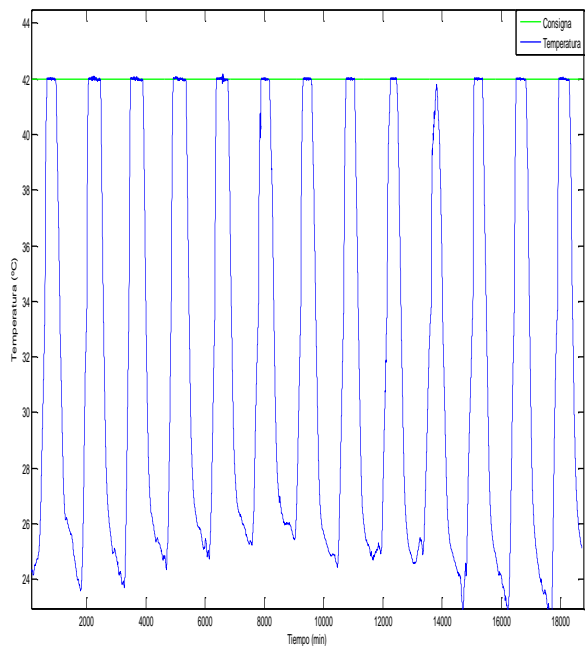
La figura 1.7 muestra la humedad relativa con un controlador PI (color rojo), la humedad relativa con un controlador PI y control anticipativo (color azul) y la consigna establecida en el 27% (color verde). Aunque en la imagen puede no apreciarse correctamente la diferencia, añadir el control anticipativo mejora aproximadamente un 2% la respuesta respecto a la consigna.

La figura 1.8 representa las señales de control. Igual que en la temperatura, a la señal del controlador PI se le añade el efecto de las perturbaciones, de manera que el controlador posee información de las perturbaciones antes de que estas entren en acción. Esto es lo que permite mejorar la respuesta frente a las perturbaciones.

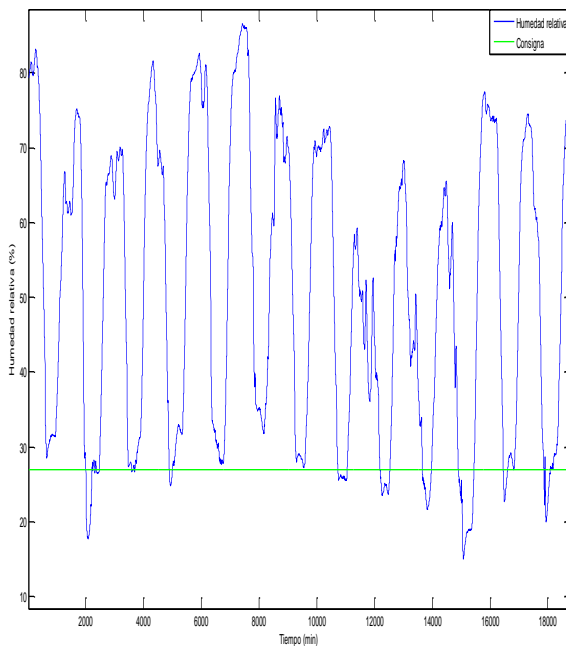
Las gráficas 1.9 y 1.10 muestran ampliaciones de la humedad relativa en la zona que corresponde al medio día solar, para los días 1 y 3. Se observa que este control tiene peores resultados que el control de temperatura. Esto se debe a que la humedad relativa tiene una respuesta muy no lineal y resulta complejo aproximar su respuesta mediante modelos lineales.

Una vez comprobado el efecto positivo del control anticipativo, la tercera estrategia de control ya cuenta con este. La estrategia consiste en un control selectivo, que permita actuar sobre la temperatura y la humedad relativa, al contrario que en los casos anteriores, que solo se controlaba una de las dos variables. En función de unas condiciones previamente establecidas, se escoge cuál de las dos variables será controlada en cada momento. Estas condiciones han sido fijadas para que se dé prioridad al control de la temperatura, variable principal en el crecimiento de los cultivos, y cuando esta se encuentre dentro de un rango β , se pasará al control de la humedad relativa.

Los resultados de este último control se muestran en la figuras 1.11, 1.12, 1.13, 1.14, 1.15 y 1.16:



a. Control de temperatura



b. Control de humedad

Figura 1.11 Control selectivo

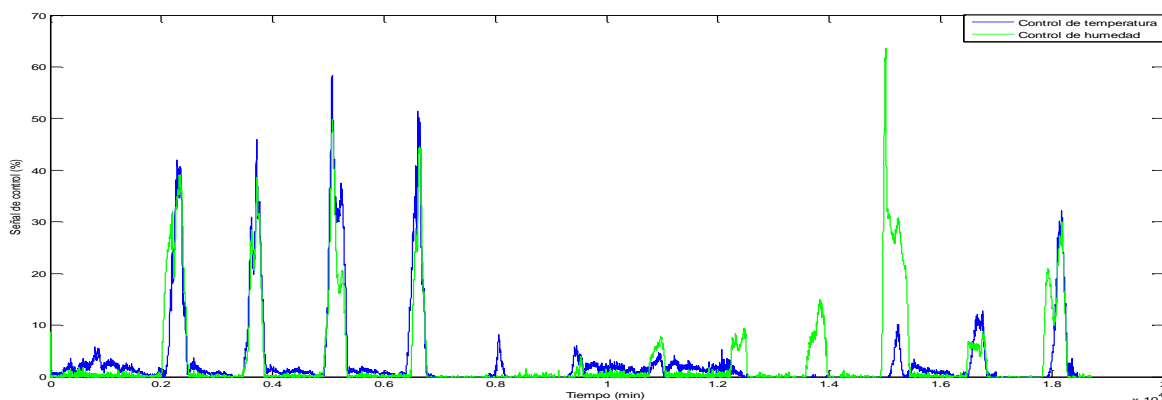


Figura 1.12 Señal de control del control selectivo

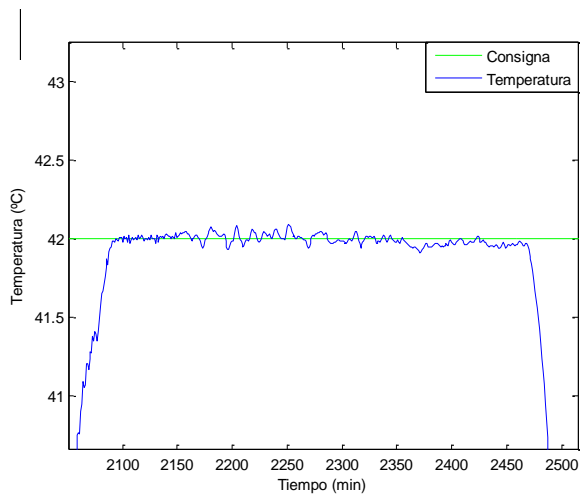


Figura 1.13 Control de temperatura para el día 2

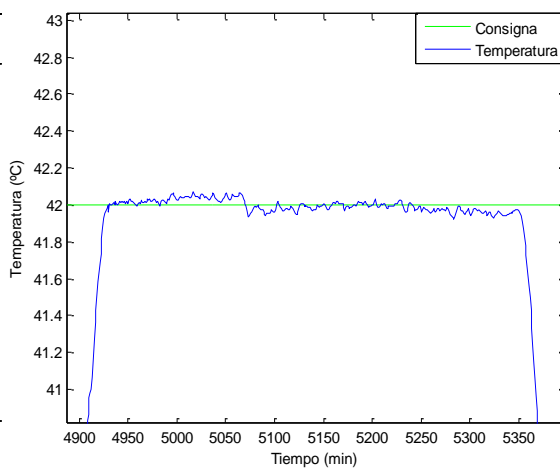


Figura 1.14 Control de temperatura para el día 4

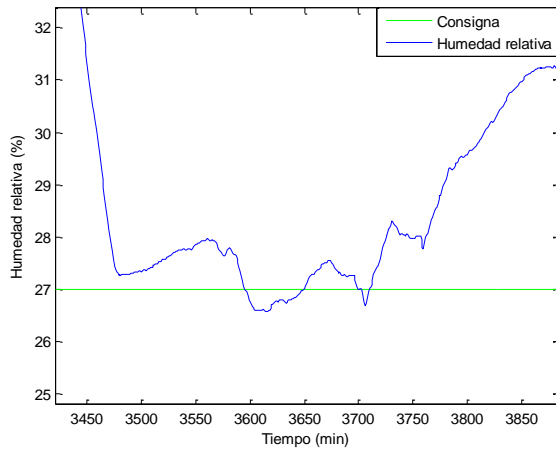


Figura 1.15 Control de humedad para el día 3

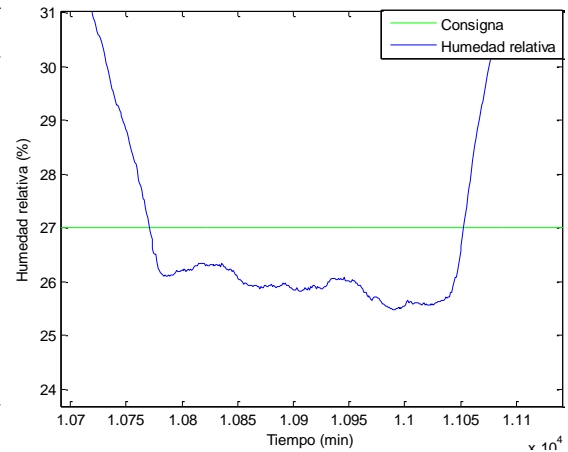


Figura 1.16 Control de humedad para el día 8

La primera gráfica representa la temperatura controlada (color azul) y la consigna establecida en 42 °C (color verde). La segunda gráfica muestra la humedad relativa (color azul) y su consigna (color verde), establecida en el 27%. La tercera gráfica muestra la señal de control de la temperatura (color azul) y de la humedad (color verde). Las dos gráficas siguientes presentan una ampliación del control de temperatura para el día 2 y el día 4 y las dos últimas son una ampliación de la humedad relativa en los días 3 y 8.

Se puede apreciar como el control de la temperatura de esta estrategia es muy similar al control de la temperatura cuando ésta era la única variable a controlar, visto anteriormente. Esto se debe a que se ha priorizado este control. Sin embargo, la humedad sí que muestra cambios significativos. Al formar parte del lazo de control secundario, solamente actúa cuando el lazo principal está correctamente controlado y hay días, como el mostrado en la figura 1.16, en los que la humedad no consigue llegar a la consigna establecida.

Las señales de control muestran las acciones llevadas a cabo por cada controlador. Se puede ver que los días de mayor humedad relativa corresponden a las señales de control más agresivas del controlador.

1.5 Planificación temporal.

La tabla 1.1 con las distintas actividades llevadas a cabo para la realización del proyecto y el tiempo empleado en cada una.

Actividad realizada	Tiempo empleado
Revisión bibliográfica	2 semanas
Modelado de los procesos	3 semanas
Validación de los modelos	1 semana
Estudio de posibles estrategias de control	1 semana
Implementación de la estrategia de control seleccionada	1 semana
Análisis de los resultados obtenidos	1 semana
Elaboración de la memoria	4 semanas

Tabla 1.1 Planificación temporal

1.6 Estructura de la memoria.

La memoria se encuentra dividida en 6 capítulos:

- Capítulo 1: Interés y objetivos.

Esta parte del proyecto sirve como introducción al resto de la memoria. Se explica qué ha motivado la realización del proyecto, los objetivos principales que pretende llevar a cabo, el contexto en el que se desarrolla el proyecto, un resumen de los principales resultados obtenidos, la planificación temporal y la organización de la memoria.

- Capítulo 2: Revisión bibliográfica.

En este capítulo se realiza una descripción de los principales aspectos del control climático en invernaderos, centrándose en el control de temperatura y humedad relativa y en la ventilación como variable de control.

- Capítulo 3: Materiales y métodos.

Este apartado presenta las herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto y los métodos empleados. En él se describe el invernadero en el que se han obtenido los datos utilizados en el proyecto, las herramientas de software empleadas en el modelado y control del invernadero (MATLAB), las principales características de los sistemas de control y las técnicas de modelado y control empleadas.

- Capítulo 4: Resultados obtenidos.

En este capítulo se muestran todos los ensayos y pruebas realizados para la obtención y validación de modelos y el control del sistema. El control, a su vez, se divide en tres apartados: control de temperatura, control de humedad y control selectivo.

- Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros.

En este apartado se comentan las principales conclusiones que se han extraído de la realización del proyecto y los trabajos futuros que se podrían plantear.

- Capítulo 6: Bibliografía.

Muestra la bibliografía utilizada en la realización del proyecto.

Capítulo 2:

Control de temperatura y humedad

En este apartado se comentarán las características generales del sistema, las variables principales que le afectan, ya sean perturbaciones o variables de control, y las condiciones de trabajo de cada variable a controlar (temperatura y humedad relativa).

2.1 Problema del control climático.

Al hablar control climático en un invernadero, debemos distinguir tres tipos de variables que afectan al desarrollo del cultivo [3]:

- Variables a controlar. Engloban a aquellas variables que se desean mantener en un determinado rango o modificar su comportamiento [7] y que afectan directamente al crecimiento del cultivo. Son la radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa), la temperatura, el nivel de CO_2 y la humedad relativa del aire. Como la producción de CO_2 tiene un coste elevado, normalmente no se controla en el sudeste de España, por lo que no se tratará en este proyecto.
- Variables manipulables o de control. Son las señales que permiten modificar el comportamiento del sistema y actuar sobre el proceso. Los actuadores más comunes en los invernaderos de la zona son la ventilación natural, la calefacción y mallas de sombreo.
- Variables de perturbación. Las perturbaciones son variables externas que afectan (en la mayoría de los casos negativamente) al comportamiento de la variable controlada. Son las variables que describen el clima en el exterior del invernadero (Temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura de la bóveda celeste y lluvia), el cultivo a través de la transpiración y un conjunto de variables que describen el estado del resto de elementos del invernadero.

La siguiente figura representa las variables consideradas en este problema de control.

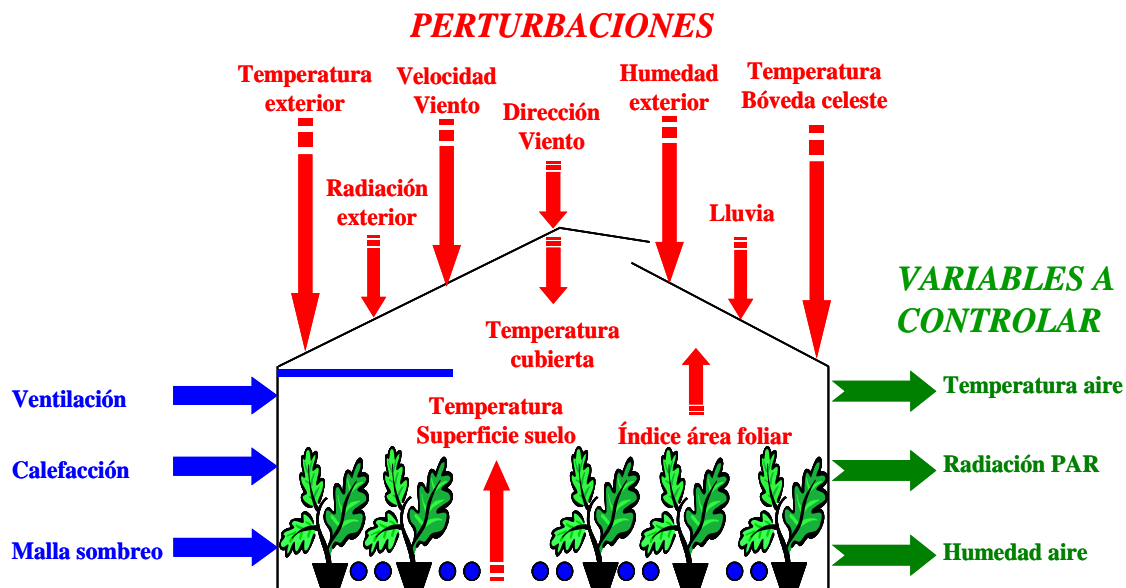


Figura 2.1 Esquema de las variables que intervienen en el problema del control climático

De esta imagen podemos extraer una de las principales características del sistema; la alta cantidad de perturbaciones a la que está sometido. Además, las variables a controlar presentan un alto grado de correlación, de manera que la variación de una de ellas puede repercutir en otras variables de manera negativa. Esto ocurre en el control de la temperatura y la humedad, ya que utilizan el mismo actuador (ventilación).

2.2 Problema general del control de la temperatura.

La temperatura es la variable climática de las que influyen directamente sobre el crecimiento del cultivo que tradicionalmente se ha controlado en los invernaderos del sudeste de España, ya que las estructuras existentes y los sistemas de actuación instalados lo permitían, convirtiéndose en la principal variable a controlar [9].

Una planta sólo crece bajo la influencia de la luz, es decir, cuando realiza la fotosíntesis, requiriendo además una temperatura relativamente alta. Durante la noche el cultivo no se encuentra activo (no existe crecimiento) por lo que no es necesario mantenerlo a una temperatura elevada. Por tanto, es conveniente una temperatura más alta durante el día que durante la noche. Debido a las favorables condiciones meteorológicas del sudeste de España, durante los periodos diurnos, la energía necesaria para alcanzar la temperatura óptima la proporciona el sol, no siendo necesario el aporte de una energía suplementaria salvo en situaciones extremas. El problema de control de la temperatura diurna radica en evitar que la temperatura sea superior a ese óptimo, ya que su efecto es perjudicial para el cultivo. Para esto se utiliza la ventilación natural que es el sistema de actuación más implantado en los invernaderos de la zona.

En el caso de que la temperatura sea menor que la consigna, se cierra la ventilación y se debería utilizar la calefacción para alcanzar el valor deseado de referencia, pero se desestima

esta opción ya que económicamente es muy costoso encender la calefacción y el beneficio que se produce no compensa este gasto. Durante los periodos nocturnos, como no es necesario mantener una temperatura elevada para el cultivo, se determina una consigna menor pero apropiada para las plantas y así se evita consumir energía, reduciendo el coste económico de la producción (gasto del combustible que utiliza la calefacción, que es uno de los costes más elevados de la producción bajo invernaderos automatizados). Mientras la temperatura se mantenga por encima del valor de consigna nocturna el controlador no actúa, encendiéndose la calefacción cuando su valor sea inferior. No importa que la temperatura se encuentre por encima de la consigna. La producción de materia seca del cultivo no se ve afectada ya que no se produce la fotosíntesis por la ausencia de radiación. Por tanto, el problema de control de la temperatura nocturna consiste en evitar que sea inferior a la consigna, sin importar que tome un valor superior. Como se puede observar estos sistemas de actuación no actúan simultáneamente ya que sus efectos son contrarios, utilizándose la ventilación para periodos diurnos, donde es necesario disminuir la temperatura, y la calefacción para periodos nocturnos donde se debe elevar la temperatura [9]. En este proyecto sólo se tratará el control de temperatura diurno.

Por otra parte, los cambios bruscos repentinos en la temperatura del invernadero no son deseables. Por ejemplo, si en el paso de la noche al día el cambio de consignas se llevara a cabo pudiendo actuar los dos sistemas simultáneamente, la calefacción daría un fuerte golpe de calor en la transición, calentándose el aire del invernadero rápidamente. Las partes sólidas del sistema (estructura, cubierta, plantas, etc.) tardarían un tiempo superior en calentarse debido a que su capacidad térmica es mayor, lo que produciría una condensación del vapor de agua del aire sobre la superficie de los cuerpos, particularmente en las hojas y frutos del cultivo o en la cubierta, cayendo el agua sobre las plantas, tal y como se observa en la figura 2.2 Este efecto puede producir algún tipo de enfermedad criptogámica.



a. Condensación en la cubierta



b. Gotas de agua sobre hojas

Figura 2.2 Condensación en los cuerpos sólidos del sistema invernadero

2.2.1 Problema de la temperatura utilizando ventilación natural.

La ventilación natural proporciona un intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero [9]. Como el aire exterior es, generalmente, más frío que el aire interior, se sitúa en las capas inferiores del volumen de aire invernadero y el aire caliente asciende a las capas superiores saliendo al exterior por la ventilación abierta. De esta forma disminuye la temperatura del aire interior del invernadero.

El problema de control de la temperatura diurna utilizando la ventilación natural presenta las siguientes características:

- Estructuralmente el sistema de actuación posee dos inconvenientes principales:
 - Saturación. La ventilación puede estar abierta entre un 0 y un 100% (0-38 °).
 - Resolución de la salida. Aunque es un sistema de actuación continuo, el posicionamiento de la ventana se realiza utilizando una cremallera cuyos dientes permiten un movimiento mínimo de un 5% (2°).
- La respuesta de la temperatura del aire interior frente a escalones en la ventilación se comporta como un sistema de primer orden con retardo de un minuto aproximadamente. Además, existe una naturaleza no lineal entre la ventilación y la temperatura.
- Las perturbaciones externas influyen notablemente en el efecto de la ventilación sobre la temperatura. Al abrirse la ventilación, el aire caliente del invernadero se reemplaza por el aire más frío del exterior. La velocidad con la que se extrae el aire caliente es función del tamaño de las ventilaciones (constante de diseño del invernadero), de la diferencia entre la temperatura interior y exterior y de la velocidad del viento, por tanto el controlador debe tener en cuenta las condiciones meteorológicas en el exterior para calcular la apertura de la ventilación.
- Para la misma temperatura exterior, a medida que el viento es mayor, la ganancia del sistema aumenta; lo contrario ocurre con la temperatura exterior, que conforme disminuye, aumenta la ganancia. Después de un profundo análisis de los datos [9], se observa que en función de las condiciones climáticas externas y la temperatura interior, la ganancia del sistema ventilación/temperatura varía entre -0.02 y -0.42 °C/% apertura, y la constante de tiempo generalmente varía entre 2 y 7 minutos, aunque en algunas circunstancias extremas sus valores no pertenezcan a esos intervalos.

2.3 Problema general del control de la humedad relativa.

El contenido de vapor de agua en el aire interior del invernadero, medido por ejemplo mediante la humedad relativa, no es una de las variables climáticas que afectan directamente al crecimiento del cultivo, aunque su control tiene un interés especial [9]. Con humedades relativas elevadas se favorece la aparición y desarrollo de enfermedades criptogámicas, además de disminuir la transpiración, lo que reduce la absorción de agua y nutrientes, pudiendo generar déficit de elementos como el calcio. Sin embargo, con humedades relativas bajas, la tasa de transpiración crece, lo que puede acarrear estrés hídrico, el cierre de los estomas y, por tanto, la reducción de la fotosíntesis. En base a estos hechos, es necesario mantener la humedad relativa del aire en un intervalo determinado. El control de la humedad relativa del aire interior del invernadero presenta dos inconvenientes principales:

- La temperatura del aire y su humedad relativa se encuentran altamente relacionadas de forma inversa (el coeficiente de correlación es superior a -0.9), por lo que una variación en una de las dos variables produce una variación inversa en la otra. Generalmente, a mayor temperatura del aire menor humedad relativa y viceversa, ya que a mayor temperatura, mayor es también la cantidad de vapor de agua que necesita para saturarse.
- Los sistemas de actuación que se utilizan para controlar la temperatura son los mismos que se utilizan para controlar la humedad, por lo que una acción de uno de ellos, modifica el valor de las dos variables.

Como la variable principal del sistema es la temperatura del aire ya que afecta directamente al crecimiento de las plantas, se considera que es la variable a controlar, tratando de mantener la humedad en un intervalo considerado como ideal, adaptando el controlador según los efectos de la ventilación y la calefacción sobre la humedad. No se controla la humedad relativa del aire interior, en el sentido de seguir una consigna, sino que se intenta que se mantenga dentro de unos límites.

2.3.1 Efecto de la ventilación sobre la humedad relativa.

La humedad relativa proporciona una medida entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y la que tendría si estuviera saturado a la misma temperatura, estando directamente relacionado con la humedad absoluta e inversamente con la temperatura, variables que se ven afectadas por el sistema de actuación, en este caso la ventilación.

Debido a la ventilación, se mezclan el aire interior y exterior, produciéndose dos efectos. Por una parte, la temperatura interior disminuye, ya que la temperatura exterior es menor, y por otra, la humedad absoluta también disminuye, ya que, generalmente, la cantidad de vapor de agua en el interior del invernadero es superior a la que contiene el aire exterior.

Capítulo 3:

Materiales y métodos

3.1 Descripción del invernadero.

Los ensayos han sido realizados en un invernadero característico de las condiciones de producción de la provincia de Almería, ubicado en la Estación Experimental “Las Palmerillas” (EEP) latitud 36° 48’ N, longitud 2° 43’ O y altitud de 63 m.

3.1.1 Localización y descripción del invernadero.

Se trata de un invernadero con orientación este-oeste y una superficie de 877 m². Su perímetro está constituido con hileras de sección transversal tipo I cuyos postes están instalados en zapatas de hormigón cada 2 m e inclinados 65°, con el extremo superior unido por miembros horizontales con sección tipo L. Las paredes laterales están formadas por cables y barras verticales ancladas al suelo y unidas a los miembros horizontales. Las partes superiores de las barras verticales y los postes inclinados están unidos a cables tensados que forman parte de una malla de 2x2 m. La parte superior del invernadero está soportada por postes verticales con zapatas de hormigón distribuidos a distancias de 8x2 m entre ellos [2].



Figura 3.1 Vista general del invernadero

En la parte central de la cubierta se forma una pequeña depresión o valle entre los postes colocados cada 8 m, donde la altura de los alambres a tensión es reducida por unas barras verticales conectadas al piso cada 2 m. La altura máxima o de cumbre de cada capilla formada entre postes es de 4.4 m y la altura del piso al valle es de 3.6 m. La cubierta es de

polietileno térmico de 0.18 mm (720 galgas de espesor) colocada entre dos mallas de alambre galvanizado unidas al conjunto de cables a tensión mencionados anteriormente.

Los laterales están protegidos por una malla de 20x10 hilos y por plástico, al igual que las ventanas cenitales, con la finalidad de evitar la entrada de insectos al invernadero.

El sistema de ventilación natural consta de ventanas laterales y cenitales. Las ventanas laterales están colocadas en los lados norte y sur, accionándose mediante un sistema de eje activado por un motor de corriente alterna, sobre el cual se enrolla el plástico al abrir y se desenrolla para cerrar.

Las ventanas cenitales están colocadas en la cumbrera de cada sección y abren hacia el lado oeste en un ángulo máximo de 45°, gobernadas también por un motor de corriente alterna. No hay sensores de posición angular instalados, por lo que la apertura de las ventanas (laterales y cenitales) se estima calculando el tiempo que tarda en abrir (o cerrar) hasta la posición deseada. Los tiempos son diferentes en apertura o cierre por el efecto de la ventilación. Las figuras 3.2 y 3.3 muestran el sistema de ventilación del invernadero.



Figura 3.2 Ventilación cenital



Figura 3.3 Ventilación lateral

El sistema de calefacción está constituido por un calefactor por aire caliente alimentado con gasoil, un ventilador de distribución de aire y un depósito de combustible. El calefactor tiene una capacidad de aporte de 95000 kcal y el ventilador es de 70 cm de diámetro con potencia de 0.39 kW.

3.1.2 Sistemas de actuación sobre el clima instalados.

3.1.2.1 Ventilación natural.

La ventilación natural consiste en un conjunto de ventanas laterales que normalmente recorren todo el perímetro del invernadero, ventanas cenitales situadas en la cubierta, o bien, una combinación de ambas. Cuando se encuentran abiertas se produce un intercambio de aire entre el interior y exterior del invernadero debido a la distribución de presiones distintas en la superficie de la estructura causadas por el viento exterior y a la diferencia de temperatura

entre los dos volúmenes de aire (interior y exterior). Debido a este intercambio de aire con el exterior, se utilizan para controlar la temperatura, humedad y concentración de CO₂ del aire interior [9].

Estas ventanas se mueven con un motor eléctrico de corriente alterna. En función de las condiciones que se den en el interior y exterior del invernadero, el controlador determinará cuánto se deben abrir las ventilaciones, dando la orden correspondiente al motor. Generalmente, no se mide la apertura real de la ventilación, sino que se calcula el tiempo que tarda en abrir hasta la posición que se desea, y la orden de apertura permanece activa durante ese periodo de tiempo. Esto presenta el problema de que las ventilaciones se cierran más rápidamente que se abren (efecto de la gravedad) y que, evidentemente, se producen errores que se van acumulando a lo largo del tiempo de funcionamiento.

Estos problemas se pueden resolver colocando sensores de posición en las ventilaciones, o bien, calculando tiempos diferentes de mantenimiento de la señal de orden para una misma posición, dependiendo de que la ventilación este subiendo o bajando. Hay que indicar que cuando la ventilación alcance el punto de máxima apertura o al cerrarse completamente, se debe informar al controlador, ya que si el motor sigue funcionando se puede llegar a averiar tanto éste como las ventilaciones. Siempre habrá que colocar unos sensores del final de carrera (micro-interruptores que abren el circuito de alimentación del motor) que indiquen cuando se llega a los extremos de cierre o apertura.

3.1.2.2 Sistema de calefacción.

Existen distintos tipos de sistemas de calefacción que se utilizan en invernaderos para controlar la temperatura y humedad del aire interior. En la mayoría de los casos se utiliza un sistema formado por tuberías de acero situadas cerca del suelo que conducen agua caliente. Por radiación y convección de calor, estas tuberías hacen que se eleve la temperatura del interior del invernadero. Un esquema de este tipo de instalaciones puede estar formado por los siguientes elementos fundamentales:

- Caldera con quemador.
- Circuito de tuberías.
- Válvulas de mezclas.
- Motobomba para circulación de agua.
- Sensores de temperatura.
- Controlador.

El quemador calienta el agua de la caldera. Esta agua ya calentada pasa a través de las tuberías principales y éstas reparten el agua a las tuberías de calefacción de cada uno de los invernaderos que se desean calentar. El agua de las tuberías principales tiene una temperatura inferior al agua de la caldera. La misión de las válvulas de mezclas y las bombas es mantener la temperatura correcta del agua que circula por las tuberías. Existen otras válvulas de mezcla que conectan las tuberías principales son las tuberías de calefacción de cada invernadero o

sector. El quemador, las bombas y las válvulas se encuentran conectadas al sistema de control, que funciona de la siguiente forma:

- El controlador mide la temperatura del agua de la caldera y, dependiendo de ésta, da las órdenes oportunas para encender o apagar el quemador. Hay que señalar que este control se debe hacer de manera independiente del control climático, ya que sólo se controla la temperatura del agua de la caldera.
- Las válvulas de mezcla de aguas se abrirán más o menos según la temperatura que se desea alcanzar. La temperatura del agua se mide a un metro o metro y medio de la válvula de mezclas. Su misión consiste en mantener el agua de la tubería principal a la temperatura idónea.
- El controlador gobierna las bombas cuando hace falta introducir agua en las tuberías o bien cuando no se desea calentar. Es un control todo o nada, pero en algunos casos existe la posibilidad de escoger entre tres posibilidades: apagado, rápido y lento, en función de las necesidades de calefacción.

La caldera que se utiliza es presurizada con hogar cilíndrico y tubos de humos, con una potencia de 2000000 Kcal, para funcionamiento con combustibles líquidos o gaseosos, y un envolvente fuertemente aislado (60 mm de lana mineral). Proporciona una temperatura del agua constante en torno a los 80° C.

Una vez que el agua se calienta en la caldera, es impulsada al invernadero mediante una bomba de circulación de acero inoxidable, con una potencia de 2.5 CV y un caudal de circulación de 25 m³/h. La válvula de mezclas permite modificar la proporción de agua procedente de la caldera que entra en las tuberías (proviniedo la otra fracción de la tubería de recirculación), y es el elemento que se utiliza para el control de la temperatura. El agua circula por una tubería de acero de 8.2 cm de diámetro, sujeta mediante apoyos en los pilares secundarios, en los laterales y en el frontal posterior del invernadero. De la tubería anterior sale, cada 1.9 m, una tubería de acero de 5.2 cm de diámetro, situada a once centímetros sobre el suelo, que llega hasta el final de las líneas de cultivo y retorna de nuevo para alcanzar a la tubería de retorno del invernadero. Ambas tuberías están colocadas sobre unos apoyos situados cada 1.9 m entre las líneas de cultivo. Una vez llega el agua caliente a la tubería de retorno, ésta realiza el mismo recorrido que la tubería de salida y vuelve a la caldera, donde es calentada para comenzar de nuevo el ciclo del sistema de calefacción. La siguiente figura (3.50) muestra detalles del sistema de calefacción instalado en los invernaderos de experimentación [9].



a. Caldera



b. Válvulas de mezclas y bombas



c. Tuberías de salida agua caliente y de retorno



d. Tuberías de calefacción en el interior del invernadero

Figura 3.4 Elementos del sistema de calefacción

3.1.2.3 Malla de sombreo.

Una malla de sombreo consiste en una pantalla que un motor eléctrico de corriente alterna extiende sobre el cultivo para controlar la radiación solar que alcanza al cultivo. El funcionamiento es similar al control de los motores de las ventilaciones, y presenta el mismo problema de que no suele realizarse en bucle cerrado, por lo que no conoce la posición de la malla. Se da la orden de cierre o apertura en función de la radiación solar, y se mantiene el tiempo necesario para alcanzar la posición deseada. El problema se resuelve cerrando o abriendo completamente la malla, y a partir de detectar esta posición, por medio de sensores de fin de carrera, se procede a efectuar la tarea de control requerida. Realmente, en la mayoría de ocasiones se mantiene completamente extendida para impedir que zonas de cultivo crezcan más rápidamente que otras.

En los invernaderos industriales de experimentación, las mallas utilizadas son de Aluminet (pantalla termo-reflectora) fabricada por Polysack Plastic Industries (Israel), con un coeficiente de transmisión de la radiación global igual a 0.5. Se disponen a lo largo de su longitud máxima, dividiéndose en 10 pantallas de 4 metros cada una, recorriendo los 40 metros longitudinales del invernadero. La disposición de la malla en divisiones equitativas facilita el movimiento de extensión de las mismas más que si se tratara de una sola unidad. Cinco motores de 0,5 CV se encargan de la extensión de las mismas, por lo que cada motor se encarga del deslizamiento de dos unidades. Además, el movimiento longitudinal de las pantallas se realiza gracias a una cremallera y engranaje, similar al de las ventilaciones, pero con posición paralela al eje horizontal que forma la malla, tal y como se puede observar en la figura 3.5.



Figura 3.5 Mecanismo de extensión de la malla de sombreado

3.2 Herramientas software utilizadas.

En este apartado se describirán los programas utilizados en el desarrollo del proyecto.

3.2.1 MATLAB.

MATLAB (nombre abreviado de “MATrix LABoratory”) es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación [15] desarrollado por MathWorks. MATLAB permite analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java.

MATLAB se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imágenes y video, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional.

3.2.1.1 Simulink.

Simulink es un entorno de diagramas de bloques para la simulación multidominio el diseño basado en modelos. Admite el diseño y la simulación a niveles de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continua de los sistemas embebidos [15].

Simulink ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y soluciones para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integra con MATLAB, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para llevar a cabo más análisis.

3.2.1.2 Herramienta de identificación de sistemas.

La herramienta de identificación de sistemas de MATLAB (System Identification Toolbox) proporciona funciones de MATLAB, bloques de Simulink y una aplicación para la construcción de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada y salida medidos.

Permite utilizar datos de entrada y salida en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia para identificar funciones de transferencia en tiempo discreto y en tiempo continuo, modelos de procesos y modelos de espacio de estado, minimizando los errores de predicción.

3.3 Descripción y tipos de sistemas de control.

Se define *sistema* al conjunto de elementos que interactúan entre sí para alcanzar un determinado objetivo. En base a esto, un *sistema de control* es igualmente un conjunto de componentes que interactúan entre sí para alcanzar una meta, la cual consiste en conseguir que las variables que describen aquello que se desea controlar tomen un conjunto de valores deseados [7].

Dentro de un sistema de control, el elemento indispensable es aquello que se desea controlar, donde al conjunto de objetos físicos que lo componen se les conoce como *planta*, y a las variables a controlar u operaciones como *proceso*. Un ejemplo de planta puede ser un invernadero para el cual se desea controlar la temperatura utilizando ventilación, donde el proceso o variable a controlar es dicha temperatura interior. Un proceso se describe como una caja negra a la que le entran una serie de entradas y devuelve un conjunto de salidas, como se puede observar en la figura 3.6.

A las señales de entrada se les conoce como *señales de control*, y a las de salida como salida del sistema o *variables a controlar*. Se puede observar como sobre lo que realmente se actúa en el ejemplo anterior es la posición del motor que gobierna la ventilación. Aquellos elementos que reciben la señales de control para realizar una determinada operación y poder alcanzar el objetivo final reciben el nombre de *actuadores*.



Figura 3.6 Proceso

Al diagrama expuesto en la figura 3.6 es necesario añadir más componentes para formar el sistema de control, y dependiendo de los componentes añadidos se distinguen dos tipos de sistemas de control: sistemas *de control en bucle abierto* y sistemas *de control en bucle cerrado*. En ambos casos para la construcción del sistema de control es necesario añadir un componente que se encarga de determinar qué señales son necesarias enviar a los actuadores para alcanzar la meta deseada. Este componente recibe el nombre de *controlador* y se puede observar como una caja negra que recibe como entrada el objetivo a alcanzar, también

llamado *consigna* o *valor de referencia*, y que genera como salida las señales de control que sirven de entrada a los actuadores.

Por tanto los tres componentes de un sistema de control vistos hasta ahora (controlador, actuador y proceso) son los expuestos en la figura 3.7. Esta misma gráfica presenta la arquitectura de un sistema de control en bucle abierto. La diferencia entre éste y uno en bucle cerrado se centra en que en el primero el sistema calcula las señales de control oportunas para alcanzar el objetivo u objetivos, pero no comprueba si realmente dichos objetivos están siendo conseguidos. En cambio en el segundo se utiliza lo que se conoce como *realimentación*, que consiste en medir la salida del sistema y compararlo con la consigna o valor deseado. De esta forma se comprueba la existencia de perturbaciones y en su caso el controlador tomará las acciones oportunas para indicar a los actuadores que realicen unas determinadas acciones y así poder subsanarlo. La arquitectura de un sistema de control en bucle cerrado se puede ver en la figura 3.8.

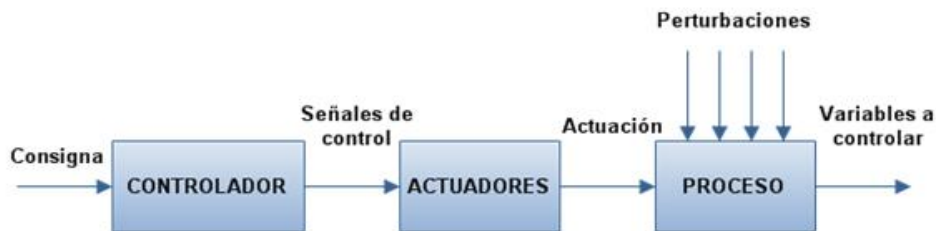


Figura 3.7 Sistema de control en bucle abierto

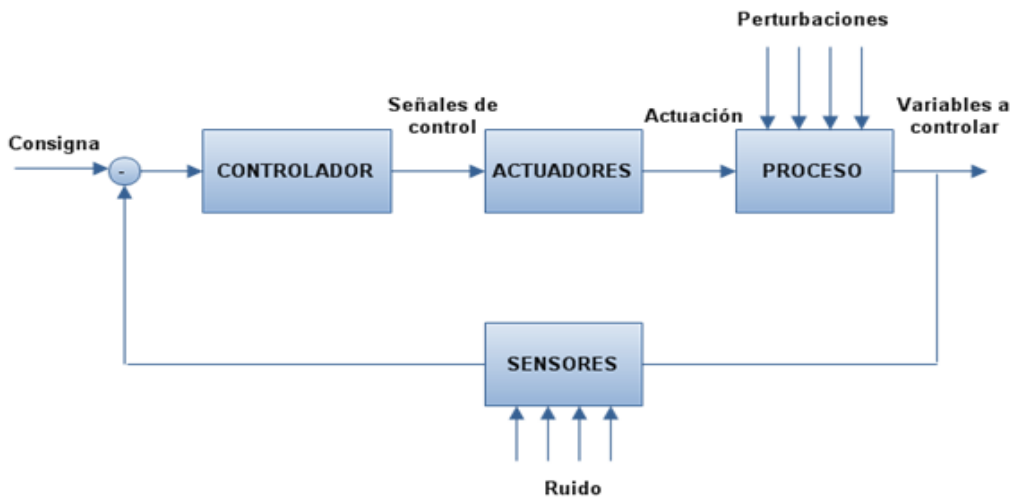


Figura 3.8 Sistema de control en bucle cerrado

Al hablar de sistemas de control en bucle cerrado surge un nuevo componente, *los sensores*, los cuales permiten medir las salidas del sistema para poder compararlas con las consignas de entrada.

Un aspecto mostrado en las figuras 3.7 y 3.8 y que no ha sido comentado hasta ahora son las *perturbaciones*, que se conocen como una serie de factores que afectan a la planta y que dan

lugar a variaciones no deseadas en las variables de proceso. Según los casos, dichas perturbaciones podrán ser medidas (en cuyo caso se pueden aprovechar estos valores medidos para mejorar el control). La presencia de perturbaciones hace que el control tenga que ser aún más delicado, ya que ahora no basta con dar unas señales de control a los actuadores y con ello alcanzar el resultado final, sino que existen una serie de elementos que hacen que dicho resultado no sea el deseado. Realmente, la justificación de la inclusión del lazo de realimentación que conforma el esquema clásico de control realimentado es la presencia de perturbaciones y dinámica no modelada (muchos algoritmos de control hacen uso de modelos para el diseño de los controladores e incluso el cálculo de la señal de control, de modo que si existen diferencias entre la dinámica predicha por el modelo y la del sistema real, aparecerán errores que podrán ser cancelados en parte mediante el bucle de realimentación).

También es importante resaltar como además los valores devueltos por los sensores puede ser erróneos debido al *ruido* provocado por diversos factores presentes en el entorno donde se mueve el sistema. Este ruido se incluye en el lazo de control, por lo que los controladores diseñados deberán tener características que les permitan atenuar el efecto del ruido sobre el lazo de control y por tanto sobre la variable o variables que se desea controlar. Si el fenómeno de las perturbaciones convertía el problema del control en algo bastante susceptible, esta susceptibilidad aumenta más si cabe con la inclusión del ruido.

De esta forma un sistema de control en general se puede ver como el mostrado en la figura 3.9, de manera que si internamente existe realimentación, se considerará un sistema en bucle cerrado, y en caso contrario en bucle abierto.

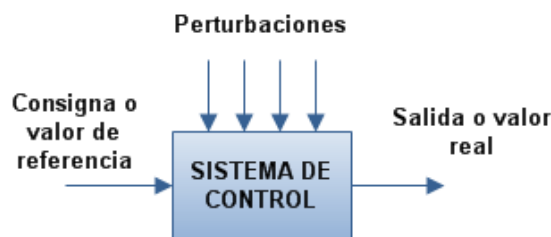


Figura 3.9 Sistema de control en bucle abierto

3.3.1 Elementos que forman un sistema de control.

Debido a que un sistema en bucle cerrado engloba un sistema en bucle abierto, se comentarán los componentes que forman al primero [5]:

- Sensores: Los sensores son los elementos que realizan una estimación del valor de la variable a controlar y demás variables que necesite el controlador. Un sensor está compuesto por (ver figura 3.10):
 - Transductor (sensor). Dispositivo que transforma un parámetro fisicoquímico en una señal eléctrica (tensión, corriente o resistencia).

- Acondicionadores de señal. La señal procedente del transductor suele ser de baja calidad, por lo que hay que repararla para las etapas siguientes. Los procesos acondicionadores más significativos que sufre la señal son el filtrado (para eliminar ruidos) y la amplificación (aumentan el valor de la señal), aparte de ser preparada para enviarla a largas distancias.
- Indicador-Registrador. Elementos donde se registra o visualiza la medida de la variable a controlar.



Figura 3.10 Componentes de un sensor

- Controlador. Es el elemento que examina la medida realizada, compara con el valor deseado y determina la acción a realizar de acuerdo con el algoritmo de control que posea. En función de la supervisión de un ser humano en las operaciones de comparar y actuar se puede clasificar en:
 - Operador humano.
 - Automático:
 - Sistema mecánico.
 - Sistema electrónico.
 - Analógico. Reciben y envían señales continuas en el tiempo.
 - Digital. El tratamiento de la señal se realiza digitalmente, por ejemplo, utilizando un computador.

Se define *controlador automático* como aquél que es capaz de identificar el error que se está produciendo, en base a las consignas de entrada y a los datos obtenidos por los sensores, y generar las señales de control adecuadas para subsanar dicho error, todo ello sin intervención humana. Por otra parte, los controladores automáticos se pueden clasificar en:

- Controladores discontinuos. Son aquellos que generalmente aportan únicamente dos estados: encendido y apagado.
- Controladores continuos. Permiten cualquier estado de control intermedio entre 0 y 100.

3.3.2 Tipos de variables.

Se puede definir una variable como todo aquel parámetro físico cuyo valor puede ser medido. Las variables se pueden clasificar en los siguientes tipos [7]:

- Variable controlada. Es aquella que se busca mantener constante o con cambios mínimos. Su valor debe seguir a la referencia.
- Variable manipulada. A través de esta se debe corregir el efecto de las perturbaciones. Sobre ésta se coloca el actuador.
- Variable perturbadora. Esta dada por los cambios repentinos que sufre el sistema y que provocan inestabilidad.
- Variable medida. Es toda variable adicional, cuyo valor es necesario registrar y monitorear, pero que no es necesario controlar.

En la figura 3.11 se puede observar el lugar donde se producen y actúan cada una de estas variables anteriormente comentadas:

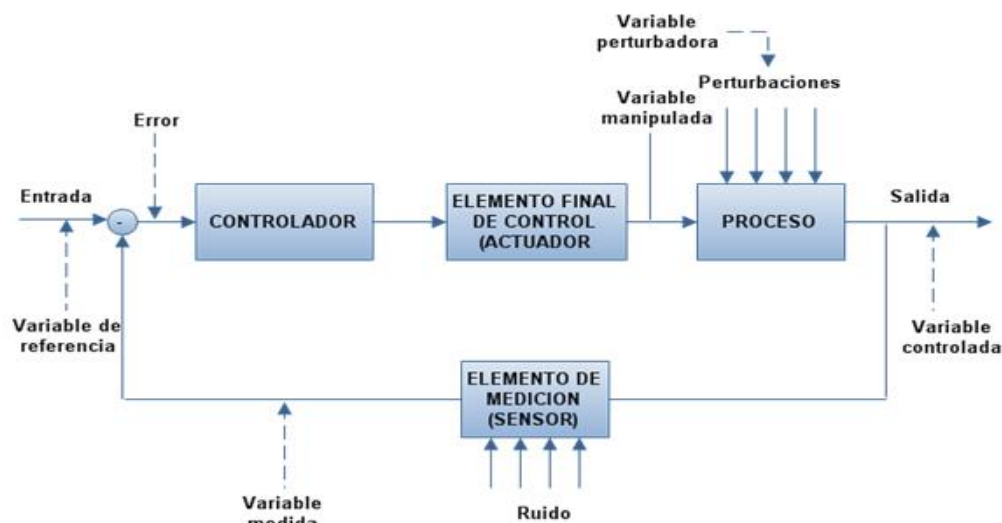


Figura 3.11 Variables en un sistema en bucle cerrado

En el caso concreto del proyecto que ocupa esta memoria, se podrían dividir las variables de la forma que sigue:

- Variable controlada. Esta variable es la que se quiere controlar, es decir, la variable que debe seguir la consigna. En este caso sería la temperatura y la humedad relativa en el interior del invernadero.
- Variable manipulada. Corresponde al porcentaje de apertura de la ventilación natural del invernadero, formada tanto por la ventilación lateral como por la cenital.

- Variable perturbadora. Las perturbaciones que afectan a nuestro sistema son las siguientes:
 - Radiación solar.
 - Temperatura exterior.
 - Humedad relativa exterior.
 - Velocidad y dirección del viento exterior.
 - Lluvia.
 - Tipo de cultivo.
 - Concentración de CO_2 exterior.
- Variable medida. Es este tipo de variables están incluidas todas aquellas que nos permite conocer el sistema de medida implantado en el invernadero de “Las palmerillas”, pero que no serán necesarias para este proyecto.

3.3.3 Clasificación de los sistemas de control.

Los sistemas de control pueden ser clasificados, basándose en varios criterios [7,8], así pues, podemos tener las siguientes clasificaciones:

- Según su dimensión:
 - Sistemas de parámetros concentrados. Son aquellos sistemas que pueden ser descritos por ecuaciones diferenciales ordinarias. También son conocidos con el nombre de sistemas de dimensión finita.
 - Sistemas de parámetros distribuidos. Son aquellos que requieren ecuaciones en diferencia (ecuaciones diferenciales con derivadas parciales). También son conocidos como sistemas de dimensión infinita.
- Según el conocimiento de sus parámetros:
 - Sistemas determinísticos. En estos sistemas se conocen exactamente el valor que corresponde a los parámetros.
 - Sistemas estocásticos. En este caso, la forma de conocer algunos o todos los valores de los parámetros, es por medio de métodos probabilísticos.
- Según el carácter de transmisión en el tiempo:
 - Sistemas continuos. Son aquellos descritos mediante ecuaciones diferenciales, donde las variables poseen un valor para todo tiempo posible dentro de un intervalo de tiempo finito. Está referido a las señales analógicas, y su comportamiento matemático es similar a una onda continua.

- Sistemas discretos. Son aquellos descritos mediante ecuaciones en diferencia, y sólo poseen valores para determinados instantes de tiempo, separados por intervalos dados por un período constante. Está referido a las señales digitales, y su comportamiento matemático es similar a un tren de pulsos.
- Según la presencia de linealidad:
 - Sistemas lineales. Son aquellos cuyo comportamiento está definido por medio de ecuaciones diferenciales lineales, es decir, los coeficientes son constantes o funciones de la variable independiente. Deben cumplir con el principio de superposición.
 - Sistemas no lineales. En caso de que una o más de las ecuaciones diferenciales no sean lineales, todo el sistema será no lineal. También se considerará como sistema no lineal a aquellos para los cuales el principio de superposición no sea válido.
- Según el comportamiento en el tiempo:
 - Sistemas invariantes en el tiempo. Ocurre cuando todos sus parámetros son constantes, y por tanto se mantiene en un estado estacionario permanentemente. Se define por ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son constantes.
 - Sistemas variantes en el tiempo. Ocurre cuando uno o más de sus parámetros varía en el tiempo, y por lo tanto no se mantiene en estado estacionario. Se define por ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son funciones del tiempo.
- Según sus aplicaciones:
 - Sistemas servomecanismos. Son aquellos donde la variable controlada es la posición o el incremento de la posición con respecto al tiempo.
 - Sistemas secuenciales. Son aquellos en donde un conjunto de operaciones preestablecidas es ejecutada en un orden dado.
 - Sistemas numéricos. Está referido a sistemas de control que almacenan información numérica, la cual incluye algunas variables del proceso codificadas por medio de instrucciones.

3.3.4 Características de los sistemas de control.

Existen formas y métodos a través de los cuales los sistemas de control pueden ser representados por medio de funciones matemáticas. Esta representación recibe el nombre de Modelado Matemático y describe las características dinámicas del sistema a través de ecuaciones diferenciales. El modelado puede ser [8]:

- Analítico. Cuando se aplican las leyes físicas correspondientes a cada componente del sistema, que en conjunto forman una estructura o función matemática.
- Experimental. Consiste en la identificación de los parámetros, mediante el análisis de datos de entrada y salida, estimando valores posibles que se ajusten al sistema.

A partir del modelado matemático, aplicando fórmulas matemáticas, teoremas, y transformadas, se puede llegar a una función que represente la relación entre la salida y la entrada del sistema. Esta función se denomina Función de Transferencia.

El proceso experimental es denominado “Identificación de Sistemas”, y corresponde a la planta o proceso que se desea analizar. Consiste en recoger datos de la variable de salida con los correspondientes datos de entrada que provocaron dicha salida, para luego, mediante algoritmos matemáticos, aproximar una función de transferencia, la cual debe generar una salida (estimada) similar a la salida del sensor, y dependiendo de la diferencia entre ambas (error) se dará validez a la función obtenida, o se tendrá que recalcular con nuevos valores en los algoritmos matemáticos de análisis.

Analizar un sistema que se desea controlar, significa analizar su comportamiento dinámico en el tiempo. Partiendo de sus características matemáticas se puede llegar a conclusiones respecto al funcionamiento del sistema, tanto aislado como dentro de un lazo cerrado, afectado por ruido y gobernado por un controlador. Para conocer dicho funcionamiento se debe llegar a conclusiones puntuales respecto a las siguientes características:

- Estabilidad. Se dice que un sistema es estable cuando después de transcurrido un tiempo t , su valor de respuesta (salida) permanece constante. A este tiempo se le denomina “tiempo de establecimiento”, y al valor alcanzado se le denomina “valor en estado estable”, el cual puede ser un valor oscilante dentro de un margen porcentual mínimo, definido a criterio del programador.

Un sistema se considera inestable cuando su respuesta al transcurrir un tiempo t se mantiene oscilando, variando entre un rango de valores periódicos o simplemente se obtiene cualquier valor aleatorio. También se define un sistema inestable como aquél que ante una entrada acotada produce una salida no acotada. Las figuras 3.12 y 3.13 muestran las respuestas de dos procesos distintos. La primera corresponde a un sistema estable, y la otra de un sistema inestable, logradas después de aplicar una entrada en escalón.

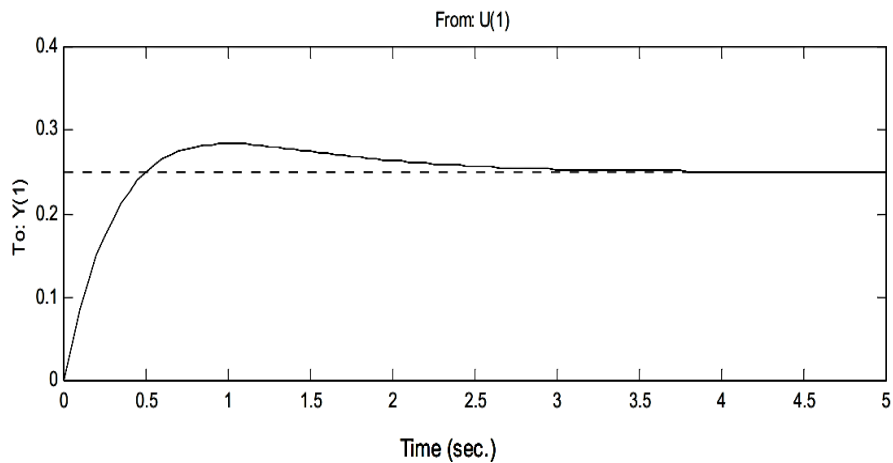


Figura 3.12 Respuesta de un sistema estable

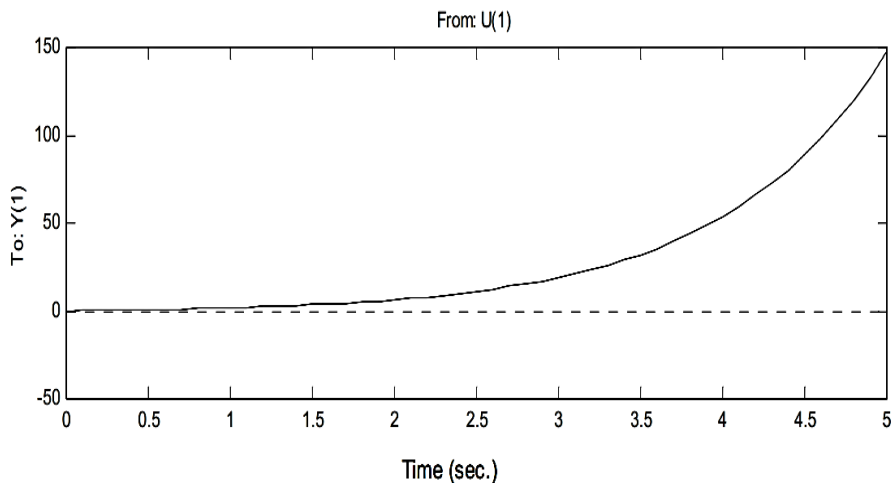


Figura 3.13 Respuesta de un sistema inestable

- **Exactitud.** La exactitud del sistema se mide en base a la desviación existente entre el valor deseado (referencia) y el valor real obtenido en la respuesta del sistema (valor en estado estable). A esta diferencia se le denomina “error en estado estable” o error de offset.
- **Velocidad de respuesta.** Esta característica indica cómo de rápido es capaz de llegar el sistema a su valor en estado estable o estacionario.
- **Sensibilidad.** Este concepto explica la dependencia de unas variables con respecto a otras. Puesto que en un sistema habrá algunas variables manipuladas, otras controladas, y otras perturbadoras, es inevitable que la acción de una repercuta sobre las otras, y es de aquí de donde surge la necesidad de conocer e identificar cada variable a fin de conocer su naturaleza.

- Alcanzabilidad. Característica del sistema que permite, mediante un controlador, llevar a este sistema desde un estado inicial hasta otro estado cualquiera, en un tiempo finito.
- Controlabilidad. Un sistema es controlable cuando es posible llevar al sistema a una posición de equilibrio tras haberle aplicado una entrada y haber transcurrido un período de tiempo finito.
- Observabilidad. Se dice que un sistema es de rango completo observable, si mediante la observación de la salida “y” es posible determinar cualquier estado $x(t)$, en un tiempo finito.

Características dinámicas:

Las características dinámicas de una planta están dadas por el comportamiento que esta presenta ante una entrada (escalón, senoidal, rampa, etc.). Cuando las entradas no son fijas sino que varían en el tiempo, entonces también la respuesta del sistema tendrá que variar en el tiempo.

Existen diversas técnicas para analizar y caracterizar el comportamiento dinámico de una planta. Los métodos más conocidos son los siguientes:

- Ecuaciones diferenciales.
- Análisis de respuesta en frecuencia.
- Caracterización frente a entradas típicas.
- Variables de estado.
- Ubicación geométrica de polos y ceros.

Muchos sistemas presentan un retardo o tiempo muerto, definido como el tiempo en que el sistema siendo sometido a una entrada, no ofrece ninguna salida. Por tanto, se considera que a ciertos sistemas les toma cierto tiempo responder a los estímulos. Los retardos son propios de procesos lentos como procesos de transporte, de temperatura, etc., y en sistemas controlados a distancia.

La siguiente figura 3.14 muestra la respuesta de un sistema ante una entrada (en $t=0$), donde se aprecia una zona en la cual no se produce respuesta alguna por parte del sistema (tiempo de retardo).

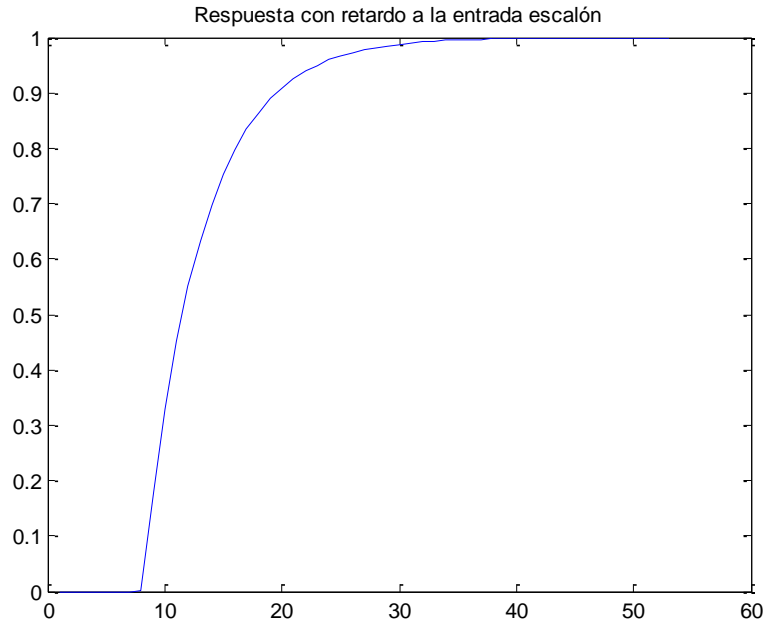


Figura 3.14 Respuesta de un sistema de primer orden

3.4 Técnicas de modelado.

En este apartado se tratarán dos técnicas diferentes para el modelo de la temperatura y de la humedad relativa en el interior del invernadero: el modelado teórico, basado en ecuaciones matemáticas, y el modelado a partir del método de la curva de reacción.

3.4.1 Modelado teórico.

3.4.1.1 Modelo simplificado de la temperatura del aire.

La figura 3.10 muestra los flujos que se han considerado en el diseño del modelo simplificado de la temperatura del aire [9]. Basándose en todos los procesos que se indican, el calor acumulado en el aire del invernadero viene dado por la siguiente ecuación de balance:

$$Q_{ac,a} = Q_{sol,a} + Q_{cnv,ss-a} + Q_{cnv,cal-a} - Q_{cnd_{cnv},a-e} - Q_{ven,a-e} - Q_{perd,a-e} - Q_{tra,cu} \quad (3.1)$$

donde $Q_{sol,a}$ es la radiación solar que absorbe el aire del invernadero, $Q_{cnd_{cnv},a-e}$ es la transferencia de calor por convección y conducción entre el aire interior y exterior del invernadero, $Q_{cnv,ss-a}$ es la transferencia de calor por convección con la superficie del suelo, $Q_{cnv,cal-a}$ es la transferencia de calor por convección con las tuberías del sistema de calefacción, $Q_{ven,a-e}$ es el intercambio de calor con el aire exterior debido a la ventilación natural, $Q_{perd,a-e}$ es el intercambio de calor con el aire exterior por infiltración por la no

estanqueidad de la estructura y las roturas en la cubierta y $Q_{tra,cu}$ es el calor latente producido por el proceso de transpiración del cultivo. Si se expresa el calor acumulado como la variación de la temperatura del aire del invernadero, $X_{t,a}$, en función del tiempo, τ , resulta:

$$c_{cesp,a} c_{den,a} \frac{c_{vol,a}}{c_{area,ss}} \frac{d X_{t,a}}{d\tau} = Q_{sol,a} + Q_{cnv,ss-a} + Q_{cnv,cal-a} - Q_{cnd,cnv,a-e} - Q_{ven,a-e} - Q_{perd,a-e} - Q_{tra,cu} \quad (3.2)$$

donde $c_{cesp,a}$ es el calor específico del aire, $c_{den,a}$ es la densidad del aire, $c_{vol,a}$ es el volumen de aire que ocupa el invernadero y $c_{area,ss}$ es el área de la superficie del suelo.

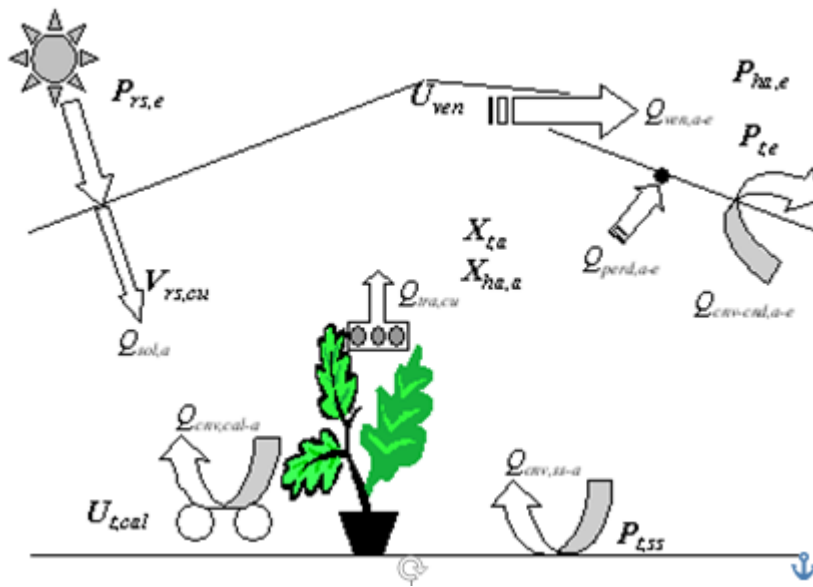


Figura 3.15 Flujos de energía y vapor de agua en el invernadero

Cada uno de estos flujos de energía se modela de la siguiente manera:

- **Radiación solar absorbida por el aire interior del invernadero.** La radiación solar que atraviesa la cubierta y alcanza el cultivo, $V_{rs,cu}$, que es la que, en parte, absorbe el aire viene determinada por:

$$V_{rs,cu} = V_{toc,cu} \cdot P_{rs,e} \quad (3.3)$$

donde $P_{rs,e}$ es la radiación solar en el exterior y $V_{toc,cu}$ es el coeficiente de transmisión de onda corta función del coeficiente de transmisión de la cubierta, del estado del blanqueado de la misma y del estado de la malla de sombreo. Por tanto, la radiación solar que absorbe el aire, $Q_{sol,a}$, viene expresada por:

$$Q_{sol,a} = c_{aoc,a} V_{rs,cu} \quad (3.4)$$

donde $c_{aoc,a}$ es el coeficiente de absorción de radiación de onda corta del aire del invernadero, aunque, como realmente el aire es inerte a la radiación solar, se trata de un parámetro de eficiencia térmica de la energía solar. Este coeficiente hay que estimarlo en el proceso de calibración del modelo.

- *Transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire interior.* El modelado de este proceso, $Q_{c_{nv,ss-a}}$ es la función de la diferencia entre la temperatura de la superficie del suelo, $X_{t,ss}$, y la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$:

$$Q_{c_{nv,ss-a}} = c_{c_{nv,ss-a}}(X_{t,ss} - X_{t,a}) \quad (3.5)$$

donde $c_{c_{nv,ss-a}}$ es el coeficiente de convección que se considera constante y que hay que estimar.

- *Transferencia de calor por convección entre las tuberías de calefacción y el aire interior.* En el modelado de este proceso, $Q_{c_{nv,cal-a}}$, se considera que la temperatura de la superficie exterior de las tuberías es igual a la del agua que circula por ellas, $U_{t,cal}$, que es una entrada de control del sistema. Este proceso se modela como una función de su diferencia con la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$, mediante la siguiente expresión:

$$Q_{c_{nv,cal-a}} = c_{c_{nv,cal-a}}(U_{t,cal} - X_{t,a}) \quad (3.6)$$

donde $c_{c_{nv,cal-a}}$ es el coeficiente de convección de la calefacción que se considera constante y que hay que estimar.

- *Transferencia de calor por convección y conducción en la cubierta entre el aire exterior y el aire interior.* El modelado de este proceso, $Q_{c_{nd_c_{nv,a-e}}}$ es una función lineal proporcional a la diferencia entre la temperatura del aire exterior, $P_{t,e}$, y la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$, es decir:

$$Q_{c_{nd_c_{nv,a-e}}} = c_{c_{nd_env,a-e}}(X_{t,a} - P_{t,e}) \quad (3.7)$$

donde $c_{c_{nd_env,a-e}}$ es el coeficiente de pérdidas que se considera constante y se estima empíricamente.

- *Transferencia de calor con el aire exterior debido a ventilación y pérdidas por infiltración.* Los dos flujos se modelan simultáneamente ya que el proceso de las pérdidas por infiltración entre el exterior y el interior se incluye como un efecto

constante en el flujo de ventilación, $V_{ven,flujo}$. Por tanto, se utiliza el siguiente modelo para describir estos procesos:

$$Q_{ven,a-e} + Q_{perd,a-e} = \frac{c_{den,a} c_{esp,a}}{c_{area,ss}} V_{ven,flujo} (X_{t,a} - P_{t,e}) \quad (3.8)$$

El flujo de ventilación se encuentra modelado en función de la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior, y de la velocidad del viento. Este modelo se caracteriza por el coeficiente de descarga, $c_{ven,cd}$, y el coeficiente debido al viento, $c_{ven,cv}$, que es necesario estimar.

- *Transferencia de calor latente por transpiración del cultivo.* El efecto de la transpiración del cultivo sobre la temperatura del aire del interior del invernadero se ha modelado como un proceso de calor latente descrito por la siguiente ecuación:

$$Q_{tra,cu} = V_{lt,vap} M_{tra,cu} \quad (3.9)$$

donde $V_{lt,vap}$ es el calor latente de vaporización función de la temperatura del aire, $X_{t,a}$, [°C] y se calcula de la siguiente manera:

$$V_{lt,vap} = 4185.5 (597 - 0.56 X_{t,a}) \quad (3.10)$$

El flujo de vapor de agua producido por la transpiración del cultivo, $M_{tra,cu}$, se modela utilizando los trabajos de Stanghellini basados en la ecuación de Penman-Monteith, que se resume en la siguiente ecuación:

$$M_{tra,cu} = \frac{1}{V_{r,tra}} \left(c_{den,a} V_{hsat,a} + \frac{V_{pcsat,a}}{c_{psico}} \frac{V_{r,cu}}{2P_{LAI}} \frac{V_{rn,cu}}{V_{lt,vap}} - c_{den,a} X_{ha,a} \right) \quad (3.11)$$

Donde c_{psico} es la constante psicométrica termodinámica, $V_{hsat,a}$ es la humedad de saturación del aire, $V_{pcsat,a}$ es la pendiente de la curva de presión de saturación del aire, $V_{r,tra}$ la resistencia a la transpiración del cultivo y $V_{r,cu}$ la resistencia del cultivo, según [9].

Este modelo simplificado presenta variaciones respecto al modelo completo de la temperatura del invernadero:

- La radiación neta que absorbe el cultivo, $V_{rn,cu}$, vital para el proceso de transpiración, se considera igual a la radiación solar despreciando el efecto de la radiación térmica o de onda larga, de forma que:

$$V_{rn,cu} = Q_{sol,cu} = V_{aoc,cu} V_{rs,cu} \quad (3.12)$$

Donde $V_{aoc, cu}$ es el coeficiente de absorción de radiación de onda corta, función del índice de área foliar para considerar el estado del cultivo.

- La resistencia de la capa límite, $V_{r, cl}$, se considera constante e igual a 200 s/m.

En este proyecto no se tratará la calefacción, por tanto algunos de los términos anteriormente comentados no se tendrán en cuenta.

3.4.1.2 Modelo simplificado de la humedad del aire.

El modelo de concentración de vapor de agua en el aire del invernadero se basa en una ecuación de balance de masa de vapor de agua. Como se indica en la siguiente figura (figura 3.11), la principal fuente de vapor de agua es la transpiración del cultivo, $M_{tra, cu}$, mientras que la principal fuente de pérdida de vapor de agua se produce por el intercambio de aire con el exterior a través de la ventilación, $M_{ven, a-e}$ y la infiltración por pérdidas, $M_{per, a-e}$.

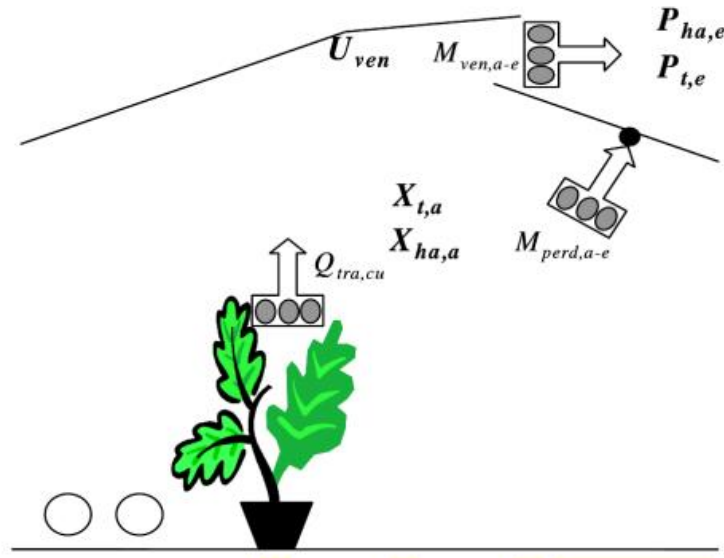


Figura 3.16 Flujos de vapor de agua en el invernadero

Por tanto, para modelar la humedad absoluta del aire, $X_{ha, a}$, medida en $\frac{Kg_{agua}}{Kg_{aire}}$, viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{den, a} \frac{c_{vol, a}}{c_{area, ss}} \frac{d X_{ha, a}}{d \tau} = M_{tra, cu} - M_{ven, a-e} - M_{per, a-e} \quad (3.13)$$

El flujo de vapor de agua debido a ventilación e infiltración se modela conjuntamente, igual que el flujo de energía, con la única diferencia de que se produce un intercambio de vapor de agua. Para modelar este proceso se utiliza la siguiente ecuación:

$$M_{ven,a-e} + M_{per,a-e} = \frac{c_{den,a}}{c_{area,ss}} V_{ven,flujo} (X_{ha,a} - P_{ha,e}) \quad (3.14)$$

Donde $P_{ha,e}$ es la humedad absoluta del aire en el exterior del invernadero y $V_{ven,flujo}$ es el flujo de ventilación. En este último término es donde se modela el efecto de pérdidas por infiltración.

3.4.2 Método de ajuste por la curva de reacción.

Aunque Ziegler & Nichols ya estudiaron la curva de reacción de un proceso, fueron Cohen & Coon quienes culminaron el método, aportaron un parámetro adicional conocido como coeficiente de autorregulación [1].

Según Ziegler & Nichols, en un lazo de control existen varios tiempos de retardo. El correspondiente a la válvula de entrada se encuentra en todos ellos, al que hay que añadir el del sistema de medida y los asociados al propio proceso bajo control. Existe gran dificultad para determinar matemáticamente todos los posibles retardos y sumarlos. Como alternativa se puede obtener la suma de todos ellos modificando la posición de la válvula y analizando la curva resultante en el sistema de medida. Este método es conocido como el método de la curva de reacción.

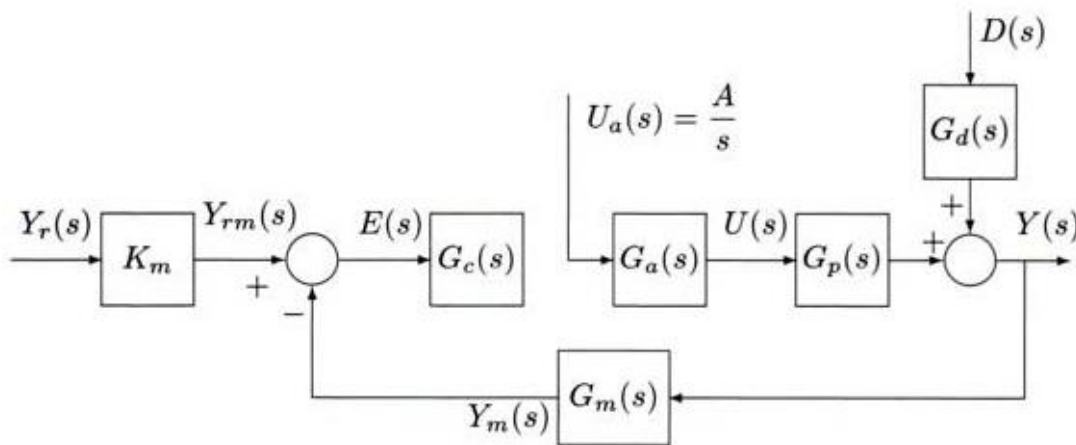


Figura 3.17 Lazo de control abierto por el método de Cohen & Coon

Para obtener la curva de reacción de un proceso, Cohen & Coon recomiendan abrir el lazo de control (Figura 3.17) entre el controlador y el actuador de entrada U_a . La función de transferencia correspondiente es la siguiente [6]:

$$G_{prc} = \frac{Y_m}{U_a} = G_a G_p G_m \quad (3.15)$$

Por tanto, la dinámica de la salida depende no sólo del proceso, sino también del actuador y del dispositivo de medición. Estos tres elementos (proceso, actuador y sensor) constituyen el entorno físico.

La respuesta y_m con frecuencia tiene una forma sigmoïdal, observada en la figura 3.18. Esta curva se puede aproximar a una función de transferencia de un sistema de primer orden con retardo.

$$G_{prc} = \frac{Y_m}{U_a} \sim \frac{K \exp(-t_d s)}{\tau s + 1} \quad (3.16)$$

Por tanto, tres parámetros deben ser estimados a partir de la curva de reacción:

- $K = \frac{B}{A}$ con B igual a la amplitud de la entrada y A igual a la amplitud de la salida.
- $\tau = \frac{B}{S}$ con S igual a la pendiente de la respuesta sigmoïdal en el punto de inflexión (hay que tener en cuenta que la determinación de S es imprecisa y los resultados dan un valor de τ aproximado).
- t_d es el tiempo muerto del sistema, en el que no se aprecia cambios en la salida, a pesar de haberse realizado un cambio en la entrada.

Este método se conoce también como el método de Broida.

Con este método es posible, además, obtener una aproximación de una función de transferencia de segundo orden con retardo.

$$G_{crp} = \frac{Y_m}{U_a} \sim \frac{K \exp(-t_d s)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (3.17)$$

Con $\tau_1 > \tau_2$

La ganancia K y el retardo t_d se obtienen igual que para un primer orden. Las constantes de tiempo τ_1 y τ_2 pueden identificarse utilizando el método de los mínimos cuadrados o el método de los momentos o método de Harriott [6].

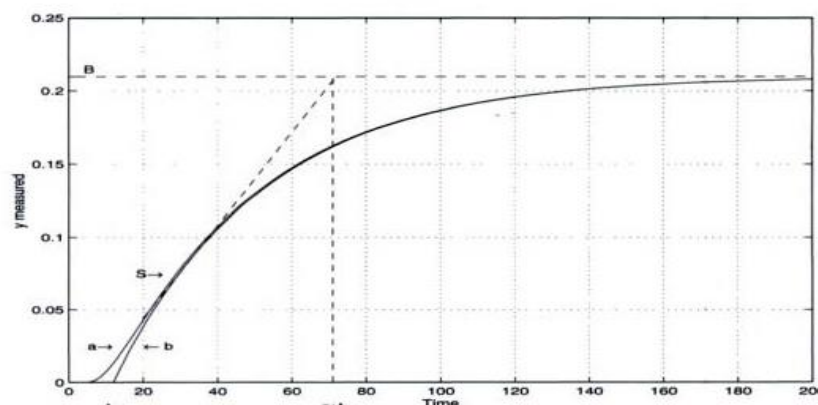


Figura 3.18 Determinación de parámetros con el método de la curva de reacción

Una vez obtenida una aproximación de los valores de los parámetros de la función de transferencia, estos deben utilizarse para afinar los controladores.

3.5 Técnicas de control.

A continuación se describirán las técnicas de control que se han llevado a cabo en este proyecto.

3.5.1 Control selectivo.

Para cada variable a controlar en un sistema de control, debe haber al menos una variable manipulable [13]. Cuando esto no ocurre, el sistema debe decidir cómo compartir las variables de control. La conmutación puede llevarse a cabo fácilmente usando dispositivos selectivos denominados selectores de señal.

El control selectivo es el nombre que recibe la aplicación de selectores de señal en una estrategia de control. En la mayoría de aplicaciones, el control selectivo es una forma de control multivariable donde los selectores facilitan la conmutación entre distintas estrategias de control. Los selectores permiten el cambio de una estrategia a otra sin alterar el proceso.

El control selectivo puede utilizarse también con otros usos:

- Protección de rebasamientos en equipos o de obstáculos operacionales (anulaciones).
- Arranque y parada automáticos.
- Protección de posibles fallos de los instrumentos.
- Selección de valores extremos.

3.5.1.1 Control override.

El control override es un caso particular de control selectivo que se da cuando se disponen de diversos reguladores con objetivos diferentes, pero sólo se cuenta con un actuador a trabajar sobre una única variable manipulada [2]. En este caso, algún criterio ha de determinar cuál será el regulador que pasará a tomar el control sobre la variable manipulada en cada momento. La figura 3.14 muestra un diagrama de bloques propio de este tipo de control.

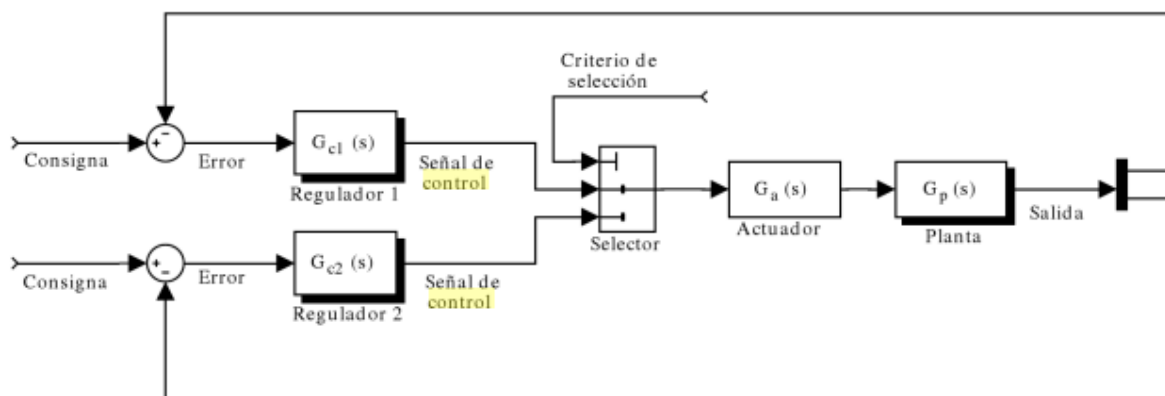


Figura 3.19 Diagrama de bloques del sistema de control override

Esta clase de control es muy habitual cuando, sobre un mismo proceso, hay que cumplir criterios de eficiencia de la planta, de bajo coste de producción o mantenimiento, de seguridad, etc.

3.5.2 Control PID.

El control PID es el algoritmo más comúnmente utilizado. La mayoría de los circuitos realimentados en la práctica se basan en controladores PID o variaciones de estos.

En la literatura podemos encontrar la siguiente versión de este controlador:

$$u(t) = ke(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} \quad (3.18)$$

Donde u es la señal de control y e es el error de control ($e = r - y$). La señal de control es por tanto una suma de tres términos: el término P (ajuste proporcional al error), el término I (proporcional a la integral del error) y el término D (proporcional a la derivada del error). Los parámetros del controlador son la ganancia proporcional k , la ganancia integral k_i y la ganancia derivativa k_d . El controlador también se puede parametrizar como:

$$u(t) = k \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.19)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y T_d tiempo derivativo. La parte proporcional actúa sobre el valor actual del error, la parte integral representa la media de los errores pasados y la parte derivativa es una predicción de errores futuros, basada en la extrapolación lineal [3].

- Acción proporcional.

La parte proporcional representa el producto de la señal de error y la constante proporcional para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero [7,16]. La fórmula de la parte proporcional viene dada por:

$$P = K_p e(t) \quad (3.20)$$

- Acción integral.

El modo de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error se integra y después se multiplica por una constante I. A la respuesta integral se le suma la respuesta proporcional, dando lugar a un control PI, obteniendo así una respuesta más estable sin error en estado estacionario.

La fórmula de la parte integral viene dada por:

$$I = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.21)$$

- Acción derivativa.

La acción derivativa permite mejorar la estabilidad del lazo cerrado. Se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error y su función es hacer que el error sea lo menor posible, corrigiéndolo de manera que no se incremente. Su fórmula viene dada por:

$$D = K_d \frac{de}{dt} \quad (3.22)$$

3.5.3 Compensación de perturbaciones. Control anticipativo.

Los controladores con realimentación no tienen en cuenta la influencia de las perturbaciones que se producen y afectan al sistema. Debe existir un error para que se inicie la acción correctiva.

Un medio para corregir el efecto de las perturbaciones es el control feedforward, el cual compensa el efecto de las mismas antes que produzcan error en la variable controlada [1]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este tipo de control está limitado por la exactitud de las medidas, los cálculos efectuados y las perturbaciones no medidas.

El esquema del control anticipativo se muestra en la figura 3.20 [4]:

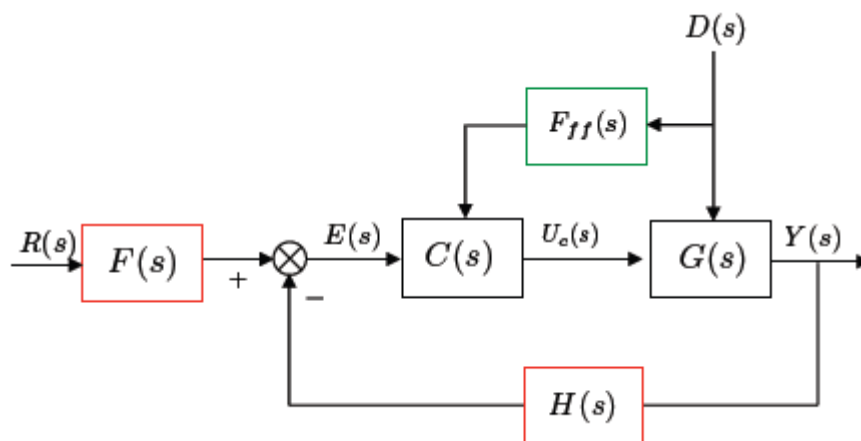


Figura 3.20 Diagrama de bloques del control anticipativo

Donde la función en bucle cerrado es:

$$G_{bc} = \frac{P(s) - G(s)F_{ff}(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (3.23)$$

Capítulo 4:

Resultados obtenidos

4.1 Batería de ensayos para la obtención de modelos.

En este apartado se describen las pruebas realizadas para la obtención de los modelos vistos en capítulos anteriores. Estos ensayos se han realizado utilizando un modelo matemático del invernadero descrito en [9] e implementado con el software MATLAB, concretamente con el paquete *Simulink* y se han validado haciendo uso de un conjunto de datos reales obtenidos del invernadero situado en la Estación Experimental de “Las Palmerillas”, descrito en el capítulo 3.

En las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran los datos de las principales perturbaciones.

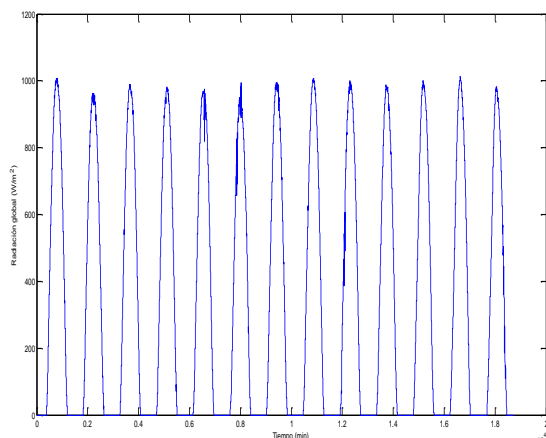


Figura 4.1 Radiación global en el invernadero

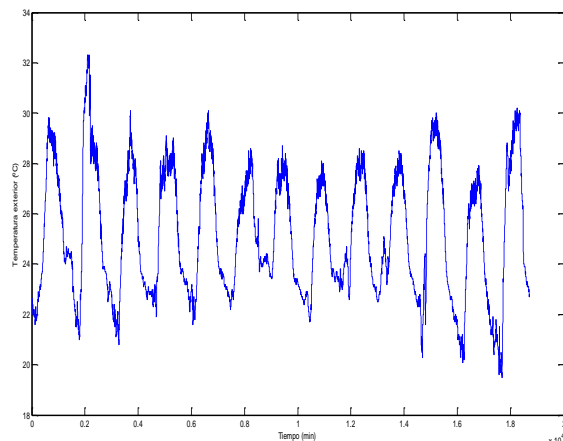


Figura 4.2 Temperatura exterior al invernadero

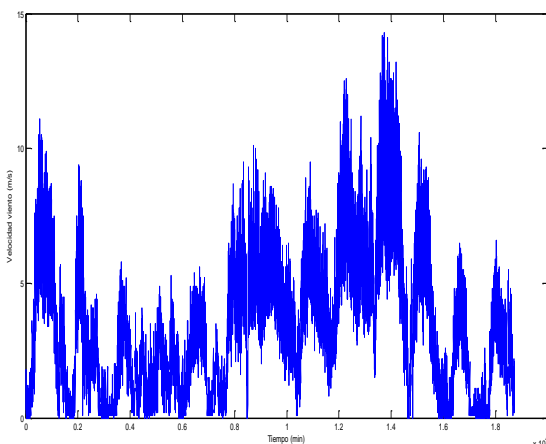


Figura 4.3 Velocidad del viento

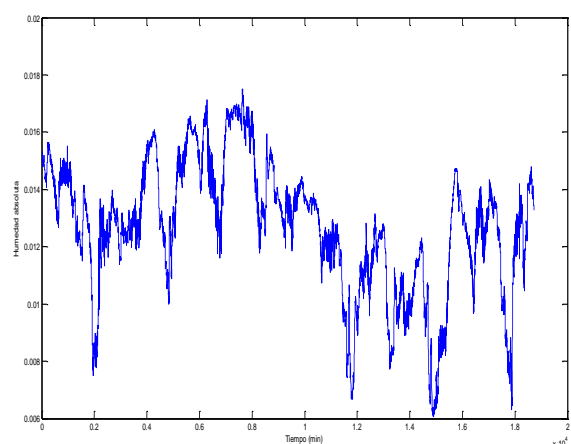


Figura 4.4 Humedad absoluta exterior al invernadero

Los ensayos se han dividido en tres fases. Primero se han realizado pruebas para obtener los modelos principales, que corresponden a los modelos de temperatura y humedad para una entrada de ventilación. Después, se han realizado ensayos para identificar las principales perturbaciones del sistema (radiación solar, temperatura exterior al invernadero, velocidad del viento y humedad absoluta exterior) y por último se han juntado las dinámicas obtenidas para dar lugar al modelo final.

Para realizar los ensayos se han utilizado datos de 13 días, de los cuales, los 7 últimos se han utilizado para obtener los modelos, por tener mejores condiciones, y los 8 primeros se han utilizado para la validación de los modelos.

Además, se ha tratado de trabajar en torno al medio día solar (entre $900W/m^2$ y $1200W/m^2$, aproximadamente), ya que al tener de entrada la ventilación, esta zona será en la que tendrá que actuar el controlador. Se han dado 6 escalones de unos 50 minutos, en las variables correspondientes, obteniendo así los parámetros de los modelos por medio del método de la curva de reacción.

Hay que destacar que, el comportamiento de las variables del invernadero no es lineal, por lo que los modelos que se obtendrán son modelos aproximados de la dinámica de la temperatura y la humedad.

A continuación se muestran todos los ensayos realizados.

4.1.1 Ensayos realizados para la obtención de los modelos que afectan a la temperatura.

4.1.1.1 Obtención del modelo principal del sistema.

Para obtener el modelo de la temperatura respecto a la ventilación como entrada, se ha modificado la ventilación, de manera que, en torno al medio día solar se han dado escalones en la ventilación con amplitudes del 15% y del 20%. La distribución de los escalones se muestra en la tabla 4.1.

Día	Amplitud	Escalones					
8	15%	0-15%	15-30%	30-45%	45-30%	30-15%	15-0%
9	15%	0-15%	15-30%	30-45%	45-30%	30-15%	15-0%
10	15%	0-15%	15-30%	30-45%	45-30%	30-15%	15-0%
11	20%	0-20%	20-40%	40-60%	60-40%	40-20%	20-0%
12	20%	0-20%	20-40%	40-60%	60-40%	40-20%	20-0%
13	20%	0-20%	20-40%	40-60%	60-40%	40-20%	20-0%

Tabla 4.1 Distribución de los escalones para la ventilación

Las figuras desde la 4.5 hasta la 4.10 muestran los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la temperatura del invernadero respecto a la ventilación.

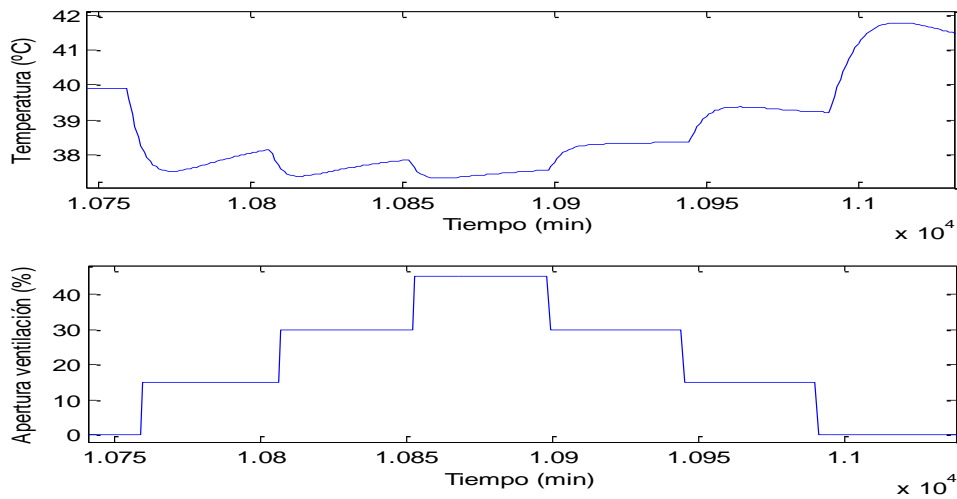


Figura 4.5 Ensayos de temperatura con entrada de ventilación. Día 8

Se puede apreciar que la respuesta corresponde a una función de transferencia de primer orden con retardo. Los parámetros obtenidos para este día se muestran en la tabla 4.2:

Escalón	Ganancia estática K (°C/%)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-15%	-0.16001	4.592	1
15-30%	-0.052289	2.5128	1
30-45%	-0.037625	2.473	1
45-30%	-0.053917	2.9802	1
30-15%	-0.071199	3.7961	1
15-0%	-0.1785	7.2077	1

Tabla 4.2 Resultados de temperatura con entrada de ventilación. Día 8

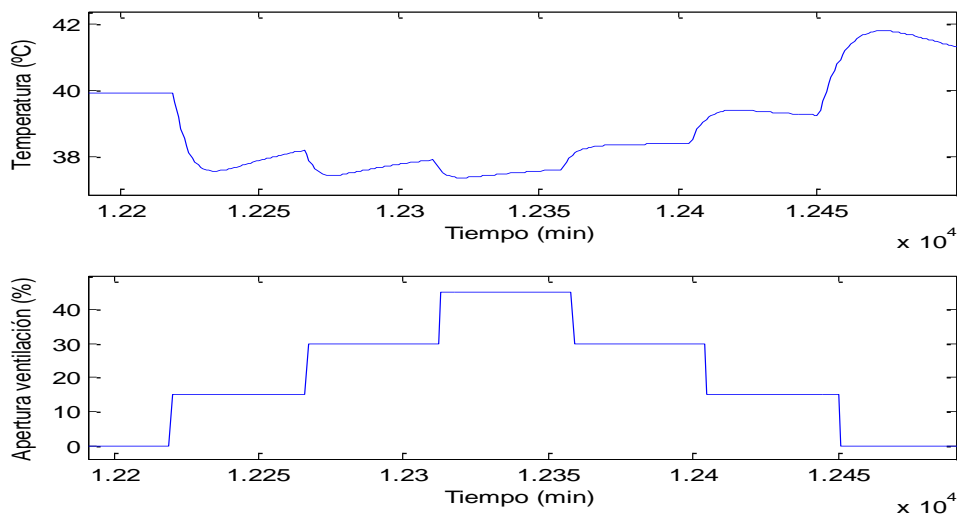


Figura 4.6 Ensayos de temperatura con entrada de ventilación. Día 9

La tabla 4.3 muestra los resultados del día 9 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K (°C/%)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-15%	-0.16328	3.9921	1
15-30%	-0.048491	2.504	1
30-45%	-0.035094	2.3376	1
45-30%	-0.051812	2.596	1
30-15%	-0.069498	3.4596	1
15-0%	-0.17233	7.4263	1

Tabla 4.3 Resultados de temperatura con entrada de ventilación. Día 9

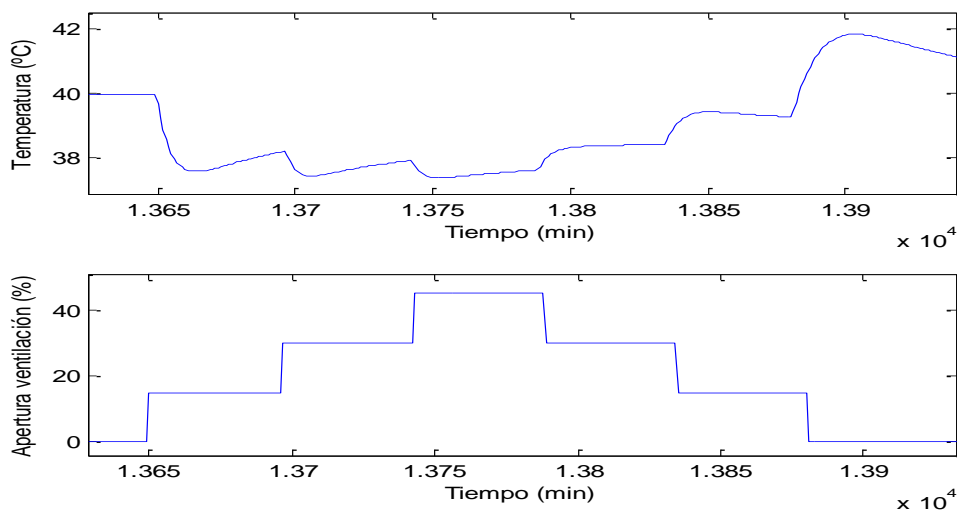


Figura 4.7 Ensayos de temperatura con entrada de ventilación. Día 10

La siguiente tabla (tabla 4.4) presenta los resultados obtenidos para los 6 ensayos realizados el día 10.

Escalón	Ganancia estática K (°C/%)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-15%	-0.15943	3.9981	1
15-30%	-0.051806	2.6955	1
30-45%	-0.036463	2.9056	1
45-30%	-0.053483	2.9203	1
30-15%	-0.072046	4.0182	1
15-0%	-0.1707	7.8203	1

Tabla 4.4 Resultados de temperatura con entrada de ventilación. Día 10

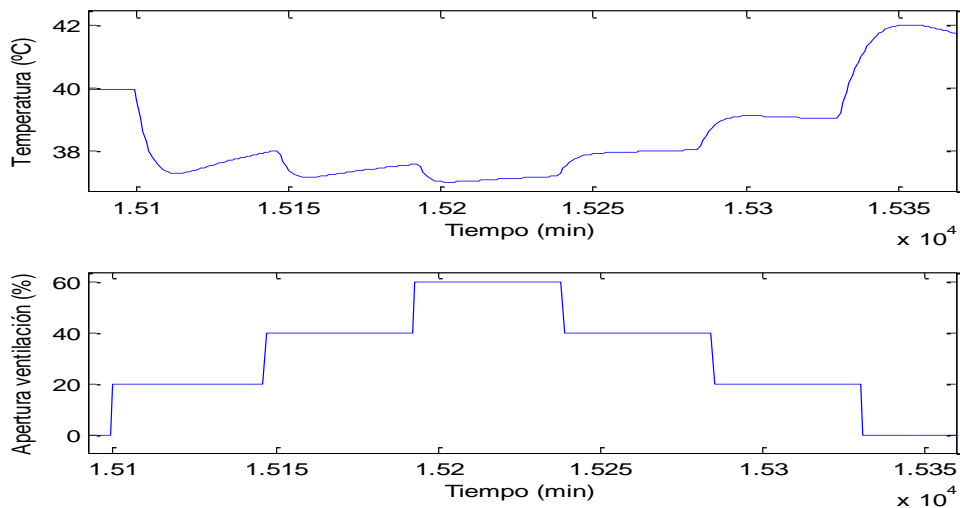


Figura 4.8 Ensayos de temperatura con entrada de ventilación. Día 11

La tabla 4.5 expone los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados el día 11.

Escalón	Ganancia estática K (°C/%)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-20%	-0.13268	3.7171	1
20-40%	-0.042848	1.1303	1
40-60%	-0.029174	1.1059	1
60-40%	-0.039388	2.4158	1
40-20%	-0.056427	2.4589	1
20-0%	-0.14578	7.8744	1

Tabla 4.5 Resultados de temperatura con entrada de ventilación. Día 11

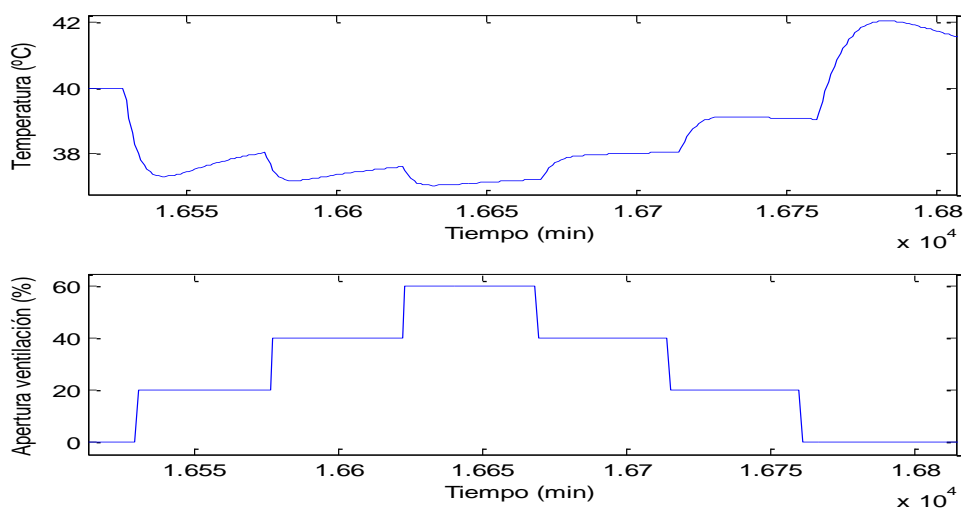


Figura 4.9 Ensayos de temperatura con entrada de ventilación. Día 12

Los parámetros obtenidos mediante la curva de reacción, para los ensayos del día 12 se muestran en la tabla 4.6.

Escalón	Ganancia estática K (°C/%)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-20%	-0.13199	3.2978	1
20-40%	-0.042225	2.2547	1
40-60%	-0.028785	2.3256	1
60-40%	-0.040342	4.7628	1
40-20%	-0.057063	3.8327	1
20-0%	-0.15773	6.7412	1

Tabla 4.6 Resultados de temperatura con entrada de ventilación. Día 12

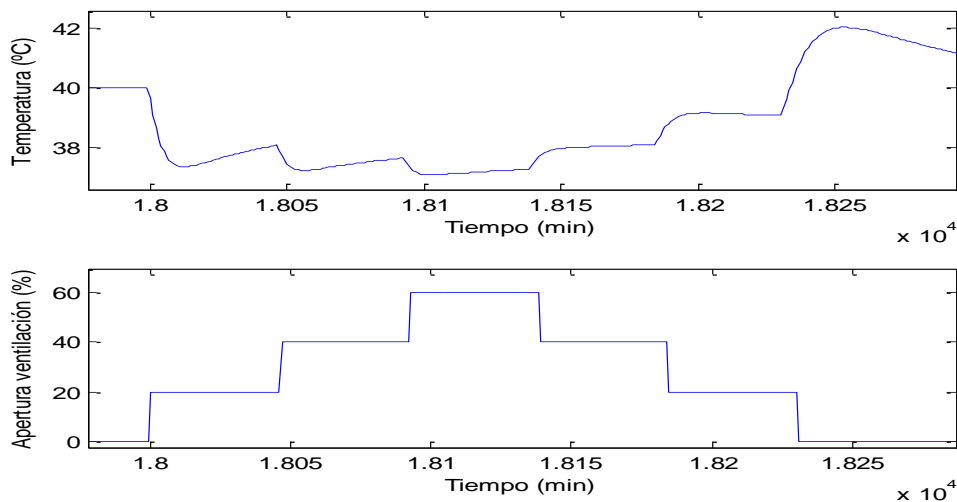


Figura 4.10 Ensayos de temperatura con entrada de ventilación. Día 13

La tabla 4.7 expone los parámetros obtenidos en los ensayos del día 13.

Escalón	Ganancia estática K (°C/%)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-20%	-0.13298	3.4236	1
20-40%	-0.044156	2.5197	1
40-60%	-0.02968	2.7053	1
60-40%	-0.041653	5.6565	1
40-20%	-0.059382	4.5984	1
20-0%	-0.15949	6.2403	1

Tabla 4.7 Resultados de temperatura con entrada de ventilación. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.8, 4.9 y 4.10):

Ganancia estática K (°C/%)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	-0,16001	-0,052289	-0,037625	-0,053917	-0,071199	-0,1785
Día 9	-0,16328	-0,048491	-0,035094	-0,051812	-0,069498	-0,17233
Día 10	-0,15943	-0,051806	-0,036463	-0,053483	-0,072046	-0,1707
Día 11	-0,13268	-0,042848	-0,029174	-0,039388	-0,056427	-0,14578
Día 12	-0,13199	-0,042225	-0,028785	-0,040342	-0,057063	-0,15773
Día 13	-0,13298	-0,044156	-0,02968	-0,041653	-0,059382	-0,15949

Tabla 4.8 Resumen de ganancias estáticas de temperatura con entrada de ventilación

Constante de tiempo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	4,592	2,5128	2,473	2,9802	3,7961	7,2077
Día 9	3,9921	2,504	2,3376	2,596	3,4596	7,4263
Día 10	3,9981	2,6955	2,9056	2,9203	4,0182	7,8203
Día 11	3,7171	1,1303	1,1059	2,4158	2,4589	7,8744
Día 12	3,2978	2,2547	2,3256	4,7628	3,8327	6,7412
Día 13	3,4236	2,5197	2,7053	5,6565	4,5984	6,2403

Tabla 4.9 Resumen de constantes de tiempo de temperatura con entrada de ventilación

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	1	1	1	1	1	1
Día 9	1	1	1	1	1	1
Día 10	1	1	1	1	1	1
Día 11	1	1	1	1	1	1
Día 12	1	1	1	1	1	1
Día 13	1	1	1	1	1	1

Tabla 4.10 Resumen de tiempos de retardo de temperatura con entrada de ventilación

Las ganancias oscilan en el rango $[-0.028785, -0.1785]$ (°C/%) y las constantes de tiempo en el rango $[1.1059, 7.8744]$ (min). Estas grandes diferencias en los parámetros, producidas por las no linealidades del sistema, generan una gran dificultad para poder aplicar correctamente el método de la curva de reacción. Sin embargo, se puede observar además que, a pesar de la gran diferencia entre parámetros, dentro de un mismo escalón son más o menos constantes, independiente del día. Concretamente, el primer y último escalón, que corresponde a aperturas de la ventilación de 0 a 15 o 20% y de 15 o 20% a 0, tienen dinámicas muy distintas a la dinámica del resto de los escalones. Esto sugiere utilizar dos tipos de modelos, uno para estos escalones y otro para el resto de escalones.

$$G_{escalon\ 1-6}(s) = \frac{-0.1554 e^{-s}}{5.528s+1} \quad (4.1)$$

$$G_{escalon\ 2-5}(s) = \frac{-0.0477 e^{-s}}{9.957s+1} \quad (4.2)$$

Lo más óptimo sería conmutar estos dos últimos modelos de manera que cada uno actuase en el instante correspondiente, sin embargo, debido a la complejidad que supone se utilizará un solo modelo: el que mejor se ajuste.

A parte de estos dos modelos se evaluará un tercero, correspondiente a la media aritmética de todos los parámetros obtenidos.

$$G(s) = \frac{-0.0836 e^{-s}}{3.814s+1} \quad (4.3)$$

Otra opción sería la idea de una lógica para apertura y cierre separada del resto [12], no obstante, esta solución complicaría tanto el modelado como el control del sistema. Este enfoque podría ser planteado como un nuevo trabajo.

4.1.1.2 Obtención de los modelos de las perturbaciones.

En este apartado se mostrarán los ensayos realizados para obtener los modelos de la temperatura respecto a las perturbaciones que más afectan al sistema. Dentro de estas perturbaciones se encuentran la radiación solar, la temperatura exterior, la velocidad del viento y la humedad exterior.

4.1.1.2.1 Obtención del modelo de la radiación solar.

Dentro de la franja de radiación que corresponde al medio día solar ($900W/m^2$ a $1200W/m^2$, aproximadamente) se han dado escalones en esta variable con amplitudes de $100 W/m^2$ y de $50 W/m^2$. La distribución de los escalones se muestra en la tabla 4.11.

Día	Amplitud (W/m^2)	Escalones (W/m^2)					
8	100	900-1000	1000-1100	1100-1200	1200-1100	1100-1000	1000-900
9	100	900-1000	1000-1100	1100-1200	1200-1100	1100-1000	1000-900
10	100	900-1000	1000-1100	1100-1200	1200-1100	1100-1000	1000-900
11	50	900-950	950-1000	1000-1050	1050-1000	1000-950	950-900
12	50	900-950	950-1000	1000-1050	1050-1000	1000-950	950-900
13	50	900-950	950-1000	1000-1050	1050-1000	1000-950	950-900

Tabla 4.11 Distribución de los escalones para la radiación solar

Las figuras desde la 4.11 hasta la 4.16 muestran los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la temperatura del invernadero respecto a la radiación solar.

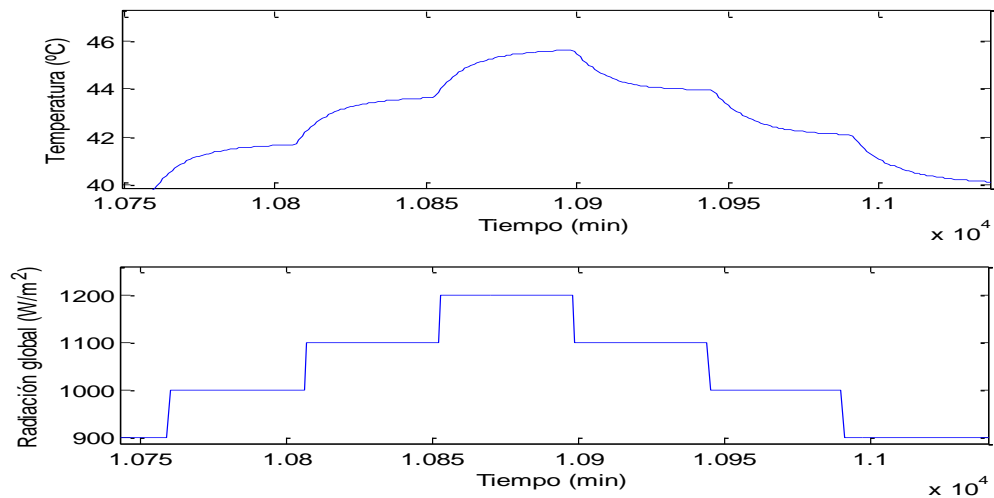


Figura 4.11 Ensayos de temperatura con entrada de radiación solar. Día 8

A primera vista se puede apreciar que la respuesta corresponde a una función de transferencia de primer orden con retardo. Los parámetros obtenidos para este día se muestran en la tabla 4.12:

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($^{\circ}Cm^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	0.018788	11.421	1
1000-1100	0.019806	11.292	1
1100-1200	0.019842	11.402	1
1200-1100	0.016887	10.539	1
1100-1000	0.019355	13.5	1
1000-900	0.020649	14.838	1

Tabla 4.12 Resultados de temperatura con entrada de radiación solar. Día 8

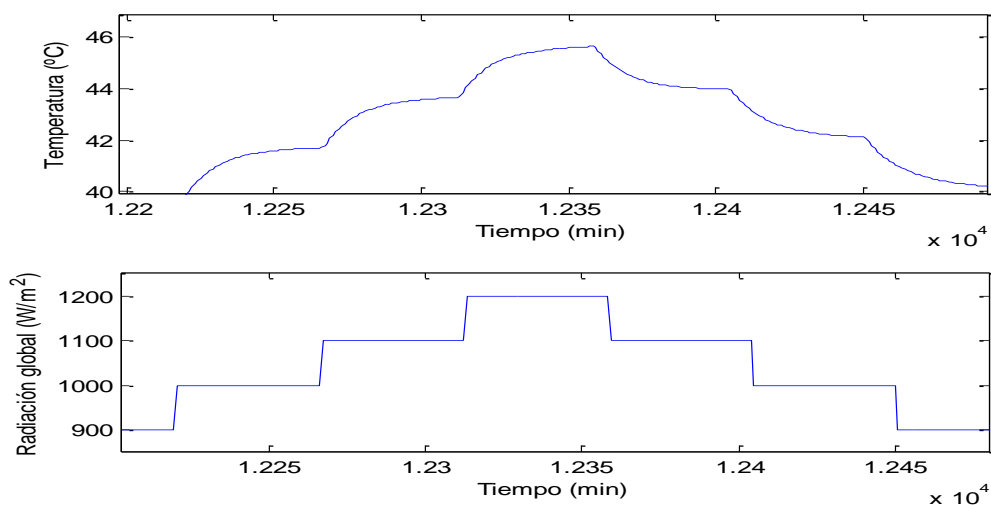


Figura 4.12 Ensayos de temperatura con entrada de radiación solar. Día 9

La tabla 4.13 muestra los resultados del día 9 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($^{\circ}Cm^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	0.018692	10.839	1
1000-1100	0.019677	11.438	1
1100-1200	0.01992	11.458	1
1200-1100	0.016546	9.2426	1
1100-1000	0.019004	13.087	1
1000-900	0.020004	13.818	1

Tabla 4.13 Resultados de temperatura con entrada de radiación solar. Día 9

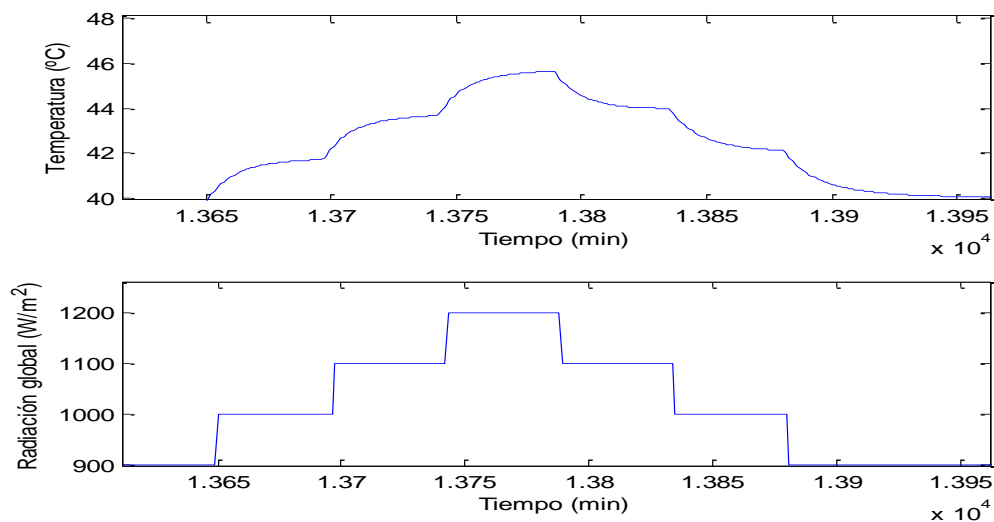


Figura 4.13 Ensayos de temperatura con entrada de radiación solar. Día 10

Los resultados obtenidos en los ensayos del día 10 se muestran en la tabla 4.14.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($^{\circ}Cm^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	0.018744	11.395	1
1000-1100	0.019714	11.516	1
1100-1200	0.019892	11.417	1
1200-1100	0.016535	9.5437	1
1100-1000	0.019	13.096	1
1000-900	0.019867	13.484	1

Tabla 4.14 Resultados de temperatura con entrada de radiación solar. Día 10

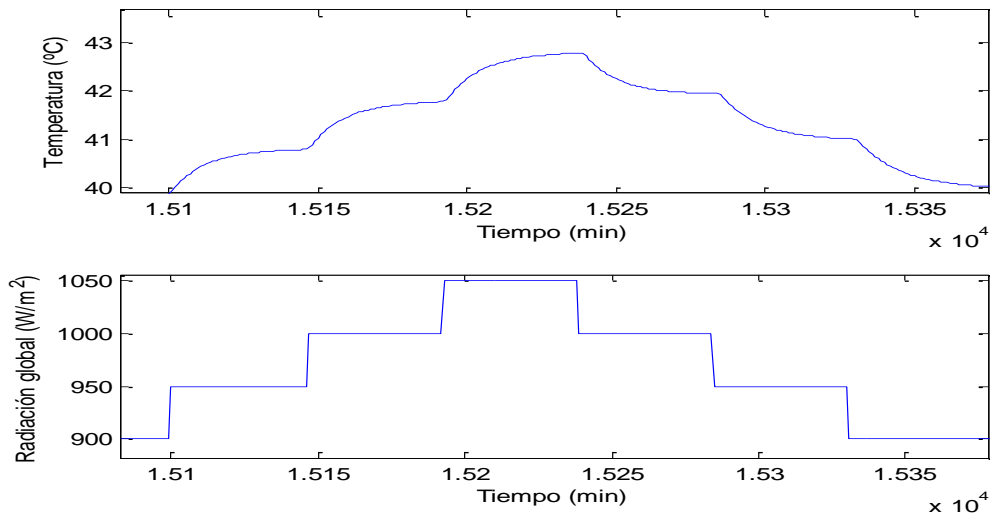


Figura 4.14 Ensayos de temperatura con entrada de radiación solar. Día 11

A continuación se presentan los parámetros obtenidos para los ensayos del día 11 (tabla 4.15).

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($^{\circ}Cm^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-950	0.018783	11.98	1
950-1000	0.019888	12.109	1
1000-1050	0.020306	12.19	1
1050-1000	0.016655	9.8815	1
1000-950	0.018718	11.616	1
950-900	0.020709	14.792	1

Tabla 4.15 Resultados de temperatura con entrada de radiación solar. Día 11

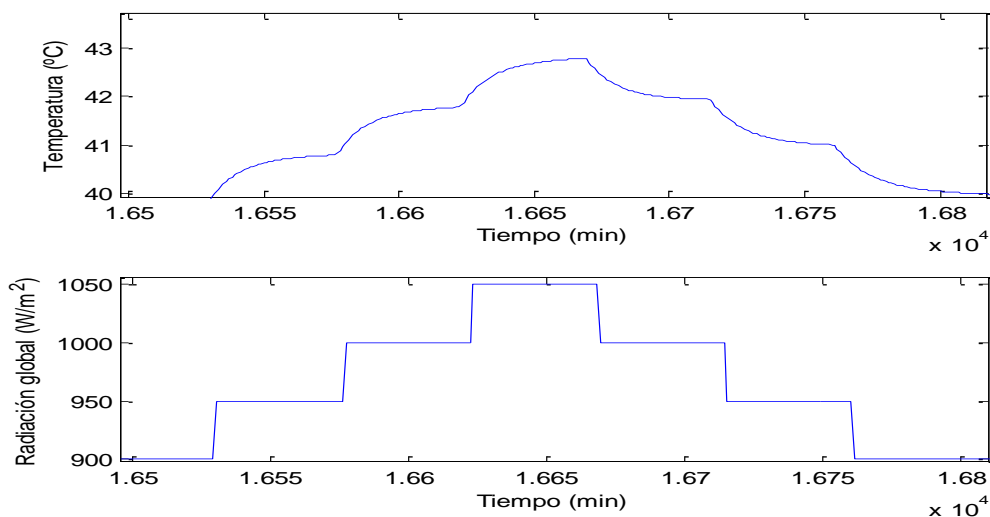


Figura 4.15 Ensayos de temperatura con entrada de radiación solar. Día 12

La tabla 4.16 muestra los resultados del día 12 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($^{\circ}Cm^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-950	0.018782	11.981	1
950-1000	0.019867	12.074	1
1000-1050	0.020257	12.103	1
1050-1000	0.01664	9.8608	1
1000-950	0.01874	11.635	1
950-900	0.020709	16.279	1

Tabla 4.16 Resultados de temperatura con entrada de radiación solar. Día 12

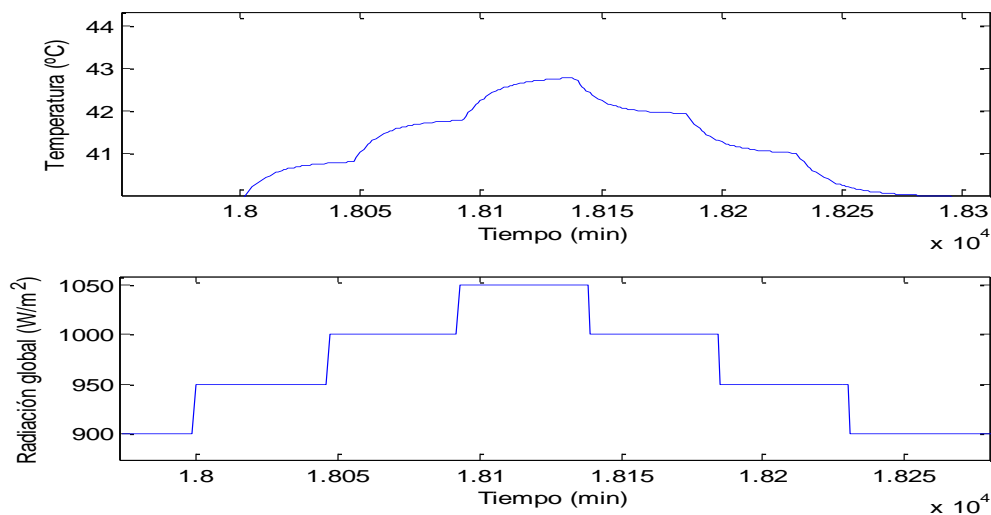


Figura 4.16 Ensayos de temperatura con entrada de radiación solar. Día 13

La tabla 4.17 expone los parámetros de los ensayos del día 13 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($^{\circ}Cm^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-950	0.018782	11.981	1
950-1000	0.019927	12.183	1
1000-1050	0.020256	12.101	1
1050-1000	0.016655	9.8839	1
1000-950	0.01868	11.542	1
950-900	0.020473	15.653	1

Tabla 4.17 Resultados de temperatura con entrada de radiación solar. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.18, 4.19 y 4.20):

Ganancia estática K ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	0,018788	0,019806	0,019842	0,016887	0,019355	0,020649
Día 9	0,018692	0,019677	0,01992	0,016546	0,019004	0,020004
Día 10	0,018744	0,019714	0,019892	0,016535	0,019	0,019867
Día 11	0,018783	0,019888	0,020306	0,016655	0,018718	0,020074
Día 12	0,018782	0,019867	0,020257	0,01664	0,01874	0,020709
Día 13	0,018782	0,019927	0,020256	0,016655	0,01868	0,020473

Tabla 4.18 Resumen de ganancias estáticas de temperatura con entrada de radiación solar

Constante de tiempo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	11,421	11,292	11,402	10,539	13,5	14,838
Día 9	10,839	11,438	11,458	9,5426	13,087	13,818
Día 10	11,395	11,516	11,417	9,5437	13,096	13,484
Día 11	11,98	12,109	12,19	9,8815	11,616	14,792
Día 12	11,981	12,074	12,103	9,8608	11,635	16,279
Día 13	11,981	12,183	12,101	9,8839	11,542	15,653

Tabla 4.19 Resumen de constantes de tiempo de temperatura con entrada de radiación solar

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	1	1	1	1	1	1
Día 9	1	1	1	1	1	1
Día 10	1	1	1	1	1	1
Día 11	1	1	1	1	1	1
Día 12	1	1	1	1	1	1
Día 13	1	1	1	1	1	1

Tabla 4.20 Resumen de tiempos de retardo de temperatura con entrada de radiación solar

Se pueden apreciar valores de ganancias en el rango $[0.016535, 0.020709]$ ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$) y constantes de tiempo en el rango de $[9.5426, 16.279]$ (min). Estos rangos, especialmente el de las ganancias estáticas, son muchos menores a los obtenidos en los modelos de la temperatura respecto a la ventilación.

La tabla de las ganancias estáticas muestra que para cada escalón los datos son más o menos similares, en los distintos días, y las diferencias entre cada escalón no son demasiado grandes. El cuarto escalón es el que más se aleja de los demás valores, sin embargo, no se considera que se aleje demasiado como para realizar un solo modelo para este escalón. Las constantes

de tiempo son muy similares de unos escalones a otros también, a excepción del último escalón.

Teniendo en cuenta que las variaciones no son demasiado grandes, tanto en las constantes de tiempo como en las ganancias estáticas y lógicamente, en los tiempos de retardo, que son todos de 1 segundo, se ha optado por evaluar un único modelo obtenido a partir de la media aritmética de todos los parámetros.

$$G(s) = \frac{0.0191 e^{-s}}{12.041s+1} \quad (4.4)$$

4.1.1.2.2 Obtención del modelo de la temperatura exterior.

Para obtener este modelo se ha modificado la perturbación correspondiente a la temperatura exterior por escalones de 5 y 10 grados de amplitud y se han estudiado los cambios producidos en la respuesta del sistema. La distribución de escalones se representa en la tabla 4.21.

Día	Amplitud	Escalones					
8	10 °C	25 – 35°C	35 – 45°C	45 – 55°C	55 – 45°C	45 – 35°C	35 – 25°C
9	10 °C	25 – 35°C	35 – 45°C	45 – 55°C	55 – 45°C	45 – 35°C	35 – 25°C
10	10 °C	25 – 35°C	35 – 45°C	45 – 55°C	55 – 45°C	45 – 35°C	35 – 25°C
11	5 °C	25 – 30°C	30 – 35°C	35 – 40°C	40 – 35°C	35 – 30°C	30 – 25°C
12	5 °C	25 – 30°C	30 – 35°C	35 – 40°C	40 – 35°C	35 – 30°C	30 – 25°C
13	5 °C	25 – 30°C	30 – 35°C	35 – 40°C	40 – 35°C	35 – 30°C	30 – 25°C

Tabla 4.21 Distribución de los escalones para la temperatura exterior

Las figuras desde la 4.17 hasta la 4.22 muestran los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la temperatura del invernadero respecto a la temperatura exterior.

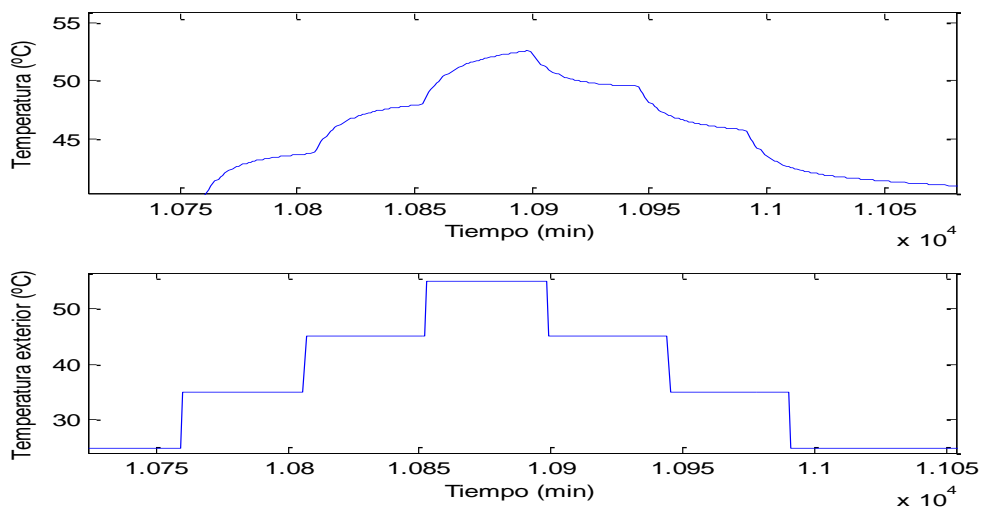


Figura 4.17 Ensayos de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 8

Se puede apreciar que la respuesta corresponde a una función de transferencia de primer orden. Los parámetros obtenidos para este día se muestran en la tabla 4.22:

Escalón (°C)	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-35	0.37805	12.775	1
35-45	0.043021	13.572	1
45-55	0.047172	14.573	1
55-45	0.030742	11.354	1
45-35	0.038253	13.165	1
35-25	0.054141	38.773	1

Tabla 4.22 Resultados de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 8

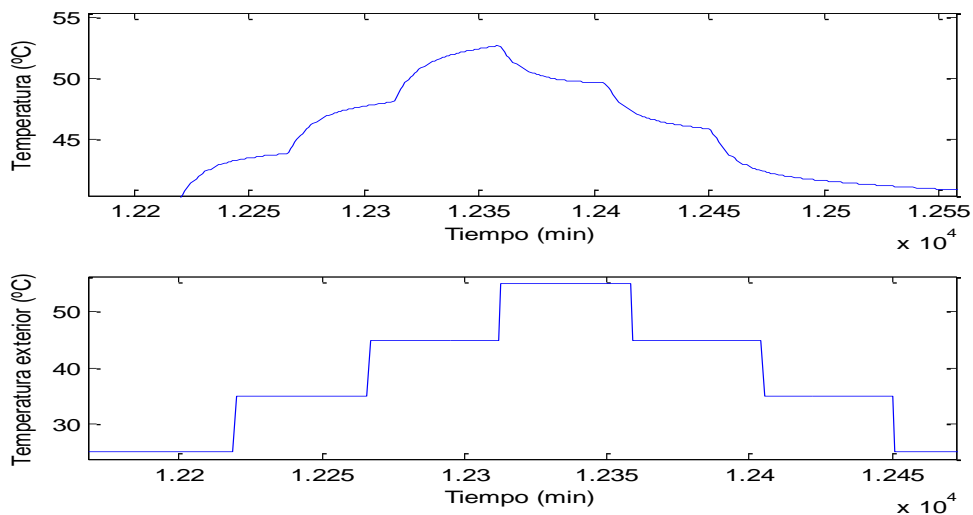


Figura 4.18 Ensayos de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 9

En la siguiente tabla (tabla 4.23) se muestran los resultados del día 9 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-35	0.37063	12.342	1
35-45	0.43339	13.641	1
45-55	0.48003	14.796	1
55-45	0.30923	11.61	1
45-35	0.38831	13.54	1
35-25	0.53569	35.319	1

Tabla 4.23 Resultados de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 9

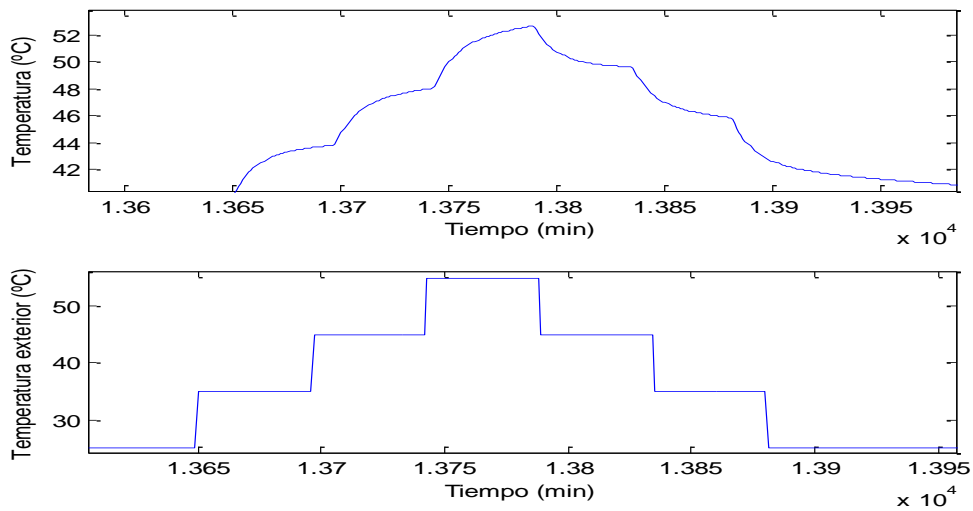


Figura 4.19 Ensayos de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 10

La tabla 4.24 presenta los resultados del día 10 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-35	0.37972	40.011	1
35-45	0.43196	13.988	1
45-55	0.46567	11.767	1
55-45	0.3179	13.96	1
45-35	0.39223	13.525	1
35-25	0.53422	35.485	1

Tabla 4.24 Resultados de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 10

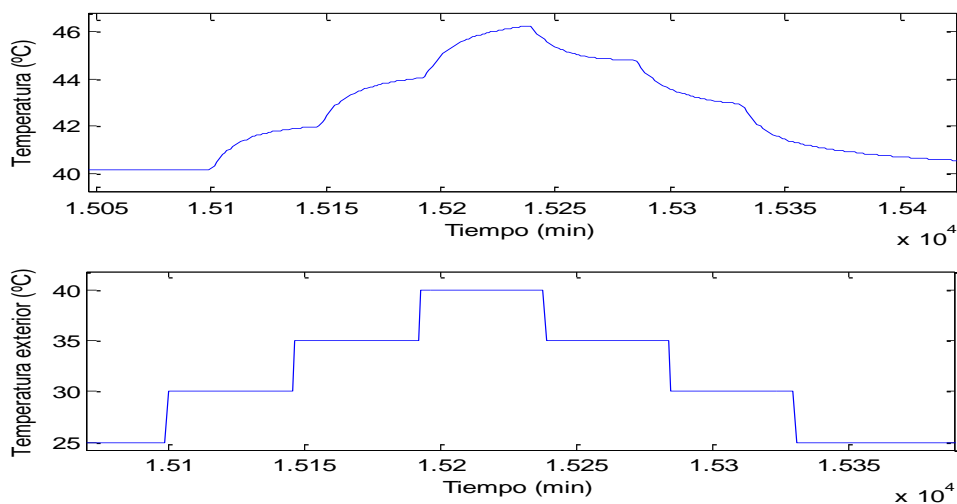


Figura 4.20 Ensayos de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 11

Los parámetros obtenidos para los ensayos del día 11 se presentan en la tabla 4.25.

Escalón (°C)	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-30	0.39829	13.347	1
30-35	0.438	14.401	1
35-40	0.45984	14.736	1
40-35	0.30074	11.064	1
35-30	0.39153	15.236	1
30-25	0.53911	43.709	1

Tabla 4.25 Resultados de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 11

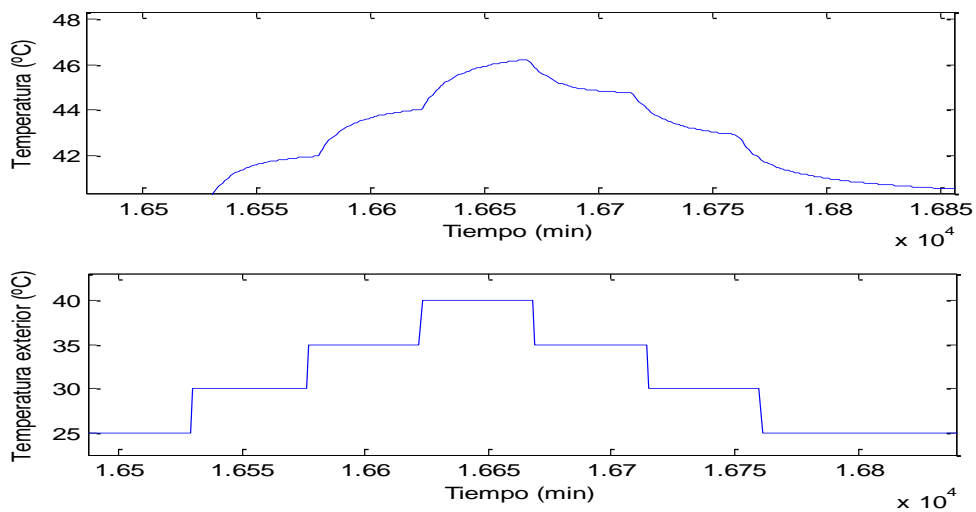


Figura 4.21 Ensayos de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 12

La tabla 4.26 muestra los resultados del día 12 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-30	0.39242	34.859	1
30-35	0.43563	14.962	1
35-40	0.46677	12.047	1
40-35	0.29419	15.324	1
35-30	0.37892	14.631	1
30-25	0.53056	39.785	1

Tabla 4.26 Resultados de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 12

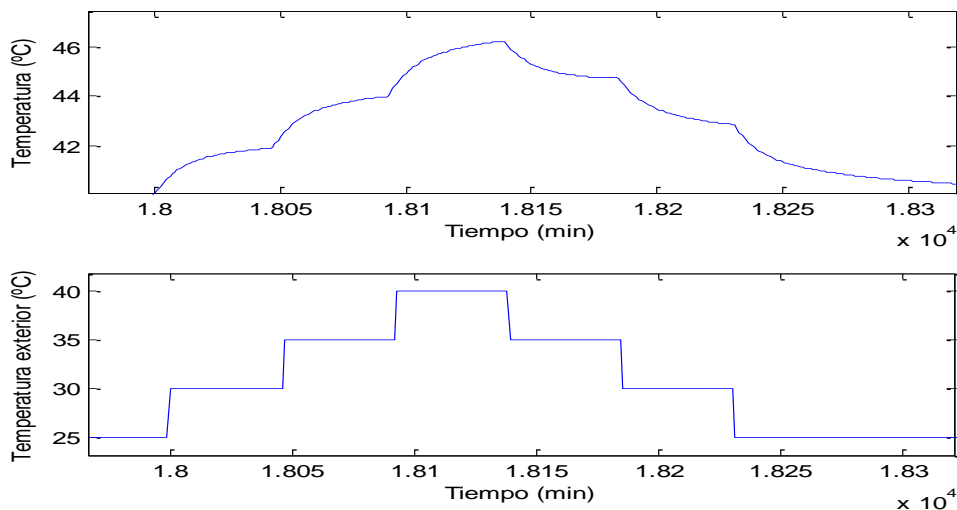


Figura 4.22 Ensayos de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 13

La tabla 4.27 expone los resultados del día 13 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-30	0.39565	52.678	1
30-35	0.43571	13.933	1
35-40	0.46152	11.897	1
40-35	0.29672	15.016	1
35-30	0.346424	14.016	1
30-25	0.46926	21.643	1

Tabla 4.27 Resultados de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.28, 4.29 y 4.30):

	Ganancia estática K					
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	0,37805	0,43021	0,47172	0,30742	0,38253	0,54141
Día 9	0,37063	0,43339	0,48003	0,30923	0,38831	0,53369
Día 10	0,37972	0,43196	0,46567	0,3179	0,39223	0,53422
Día 11	0,39829	0,438	0,45984	0,30074	0,39153	0,53911
Día 12	0,39242	0,43563	0,46677	0,29419	0,37892	0,53056
Día 13	0,39565	0,43571	0,46152	0,29674	0,36424	0,46926

Tabla 4.28 Resumen de ganancias estáticas de temperatura con entrada de temperatura exterior

Constante de tiempo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	12,775	13,572	14,573	11,354	13,165	38,773
Día 9	12,342	13,641	14,796	11,61	13,54	35,319
Día 10	40,011	13,988	11,767	13,96	13,525	35,485
Día 11	13,347	14,401	14,736	11,064	15,236	43,709
Día 12	34,859	14,962	12,047	15,324	14,631	39,785
Día 13	52,678	13,933	11,897	15,016	14,016	21,643

Tabla 4.29 Resumen de constantes de tiempo de temperatura con entrada de temperatura exterior

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	1	1	1	1	1	1
Día 9	1	1	1	1	1	1
Día 10	1	1	1	1	1	1
Día 11	1	1	1	1	1	1
Día 12	1	1	1	1	1	1
Día 13	1	1	1	1	1	1

Tabla 4.30 Resumen de tiempos de retardo de temperatura con entrada de temperatura exterior

Se han obtenido ganancias que oscilan entre 0,29419 (en el cuarto escalón) y 0,54141 (en el último escalón). Las constantes de tiempo toman valores entre 11.354 y 43.709 minutos. Al igual que ocurría en ensayos anteriores, las ganancias y las constantes de tiempo guardan similitud dentro de un mismo escalón, pero de un escalón a otro se aprecia bastante diferencia, especialmente en las ganancias estáticas. Esto se debe a que la temperatura interior no es lineal respecto a la temperatura exterior y genera diferencias en los parámetros. Además, los tres primeros días tienen amplitudes de entrada distintas a las de los tres días siguientes y se puede ver el efecto que provoca en los parámetros, generando variaciones, aunque menores que las que se generan entre escalones.

Para la obtención del modelo se han cogido los valores medios de todos los parámetros, obteniendo el siguiente resultado:

$$G(s) = \frac{0.4166 e^{-s}}{19.652s+1} \quad (4.5)$$

Se entiende que no se ajustará correctamente a todos los escalones pero si se asemejará a la dinámica principal. En los apartados anteriores se han comentado medidas que podrían mejorar la aproximación del modelo, pero que no se han llevado a cabo por su complejidad.

4.1.1.2.3 Obtención del modelo de la velocidad del viento.

Para obtener este modelo se ha modificado la velocidad del viento por escalones de 5 y 10 m/s de amplitud. La distribución de los escalones se representa en la tabla 4.31.

Día	Amplitud	Escalones					
8	10 m/s	0-10m/s	10-20m/s	20-30m/s	30-20m/s	20-10m/s	10-0m/s
9	10 m/s	0-10m/s	10-20m/s	20-30m/s	30-20m/s	20-10m/s	10-0m/s
10	10 m/s	0-10m/s	10-20m/s	20-30m/s	30-20m/s	20-10m/s	10-0m/s
11	5 m/s	0-5m/s	5-10m/s	10-15m/s	15-10m/s	10-5m/s	5-0m/s
12	5 m/s	0-5m/s	5-10m/s	10-15m/s	15-10m/s	10-5m/s	5-0m/s
13	5 m/s	0-5m/s	5-10m/s	10-15m/s	15-10m/s	10-5m/s	5-0m/s

Tabla 4.31 Distribución de los escalones para la velocidad del viento

Las figuras desde la 4.23 hasta la 4.28 muestran los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la temperatura del invernadero respecto a la velocidad del viento.

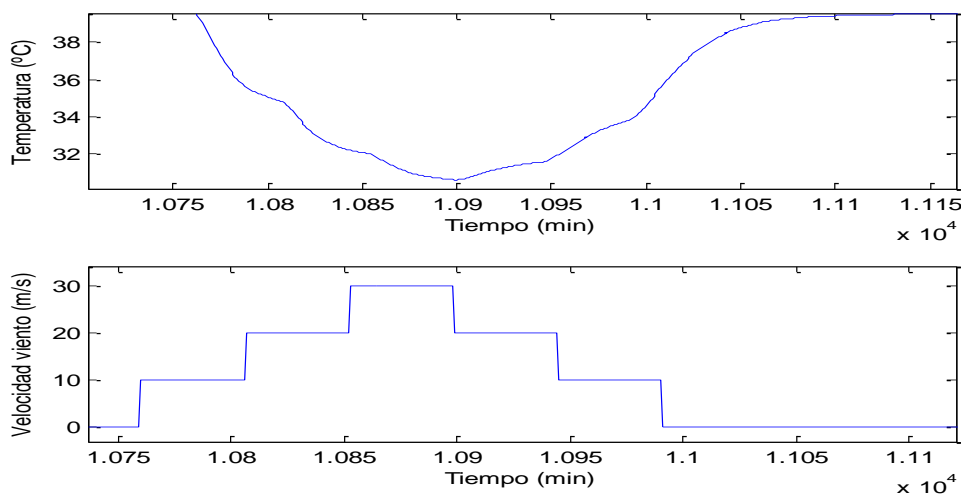


Figura 4.23 Ensayos de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 8

Se puede apreciar que la respuesta corresponde a una función de transferencia de primer orden. Los parámetros obtenidos para este día se muestran en la tabla 4.32:

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (°Cs/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-10	-0.57998	23.328	1
10-20	-0.32353	19.164	1
20-30	-0.17111	22.207	1
30-20	-0.016645	47.84	1
20-10	-0.44395	60.356	1
10-0	-0.59232	31.002	1

Tabla 4.32 Resultados de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 8

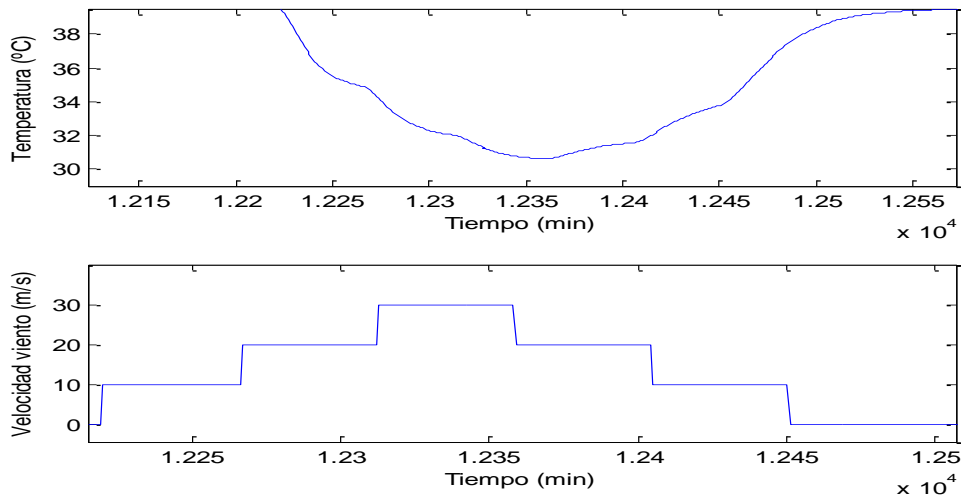


Figura 4.24 Ensayos de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 9

La siguiente tabla (tabla 4.33) presenta los parámetros obtenidos para los ensayos del día 9.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (°Cs/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-10	-0.6167	25.544	1
10-20	-0.32777	21.311	1
20-30	-0.1551	20.465	1
30-20	-0.14893	43.332	1
20-10	-0.41938	58.083	1
10-0	-0.60084	34.404	1

Tabla 4.33 Resultados de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 9

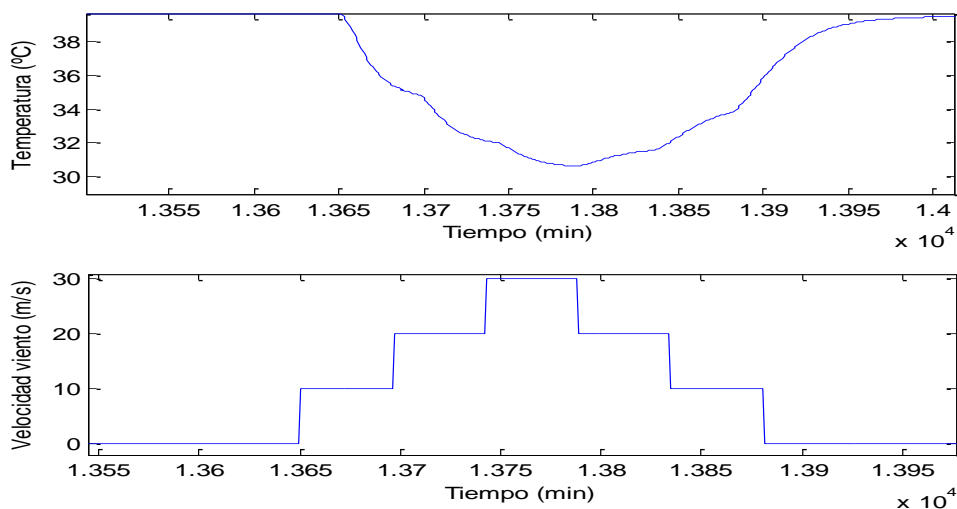


Figura 4.25 Ensayos de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 10

La tabla 4.34 expone los resultados del día 10 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (°Cs/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-10	-0.58193	24.089	1
10-20	-0.3363	21.944	1
20-30	-0.18398	25.439	1
30-20	-0.14347	46.672	1
20-10	-0.54285	82.461	1
10-0	-0.58471	29.235	1

Tabla 4.34 Resultados de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 10

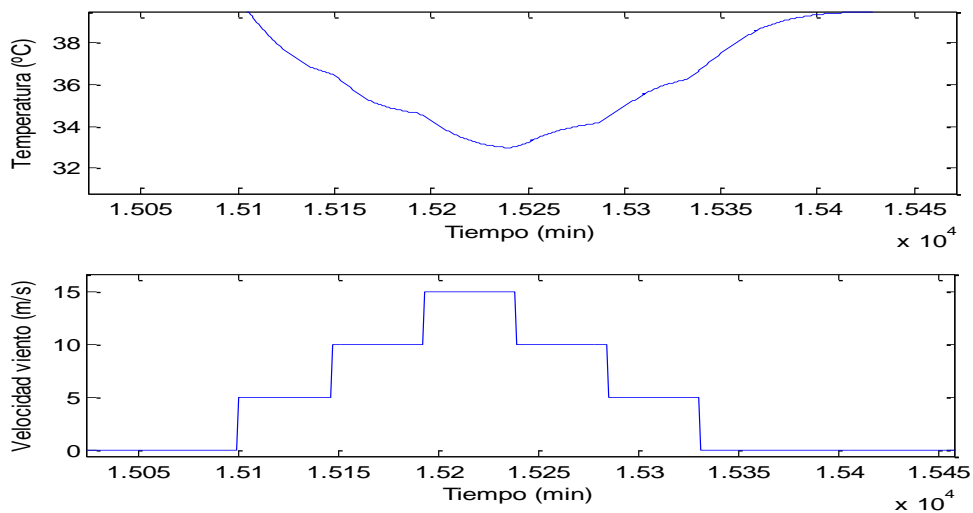


Figura 4.26 Ensayos de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 11

La tabla 4.35 expone los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados el día 11.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (°Cs/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	0.39829	13.347	1
5-10	0.438	14.401	1
10-15	0.45984	14.736	1
15-10	0.30074	11.064	1
10-5	0.39153	15.236	1
5-0	0.53911	43.709	1

Tabla 4.35 Resultados de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 11

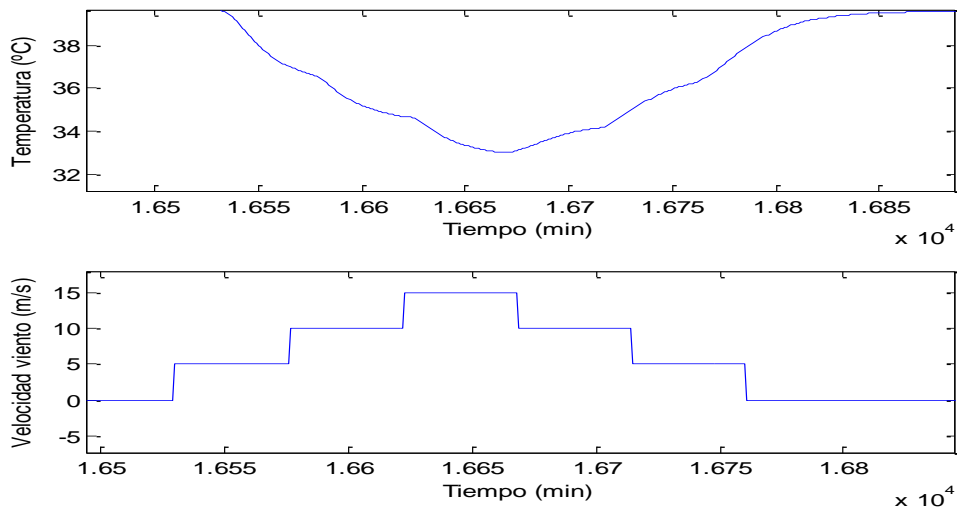


Figura 4.27 Ensayos de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 12

Los parámetros obtenidos mediante la curva de reacción, para los ensayos del día 12 se muestran en la tabla 4.36.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (°Cs/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	-0.98341	43.142	1
5-10	-0.44569	23.445	1
10-15	-0.39266	24.282	1
15-10	-0.45497	54.064	1
10-5	-0.65812	41.953	1
5-0	-0.65973	29.353	1

Tabla 4.36 Resultados de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 12

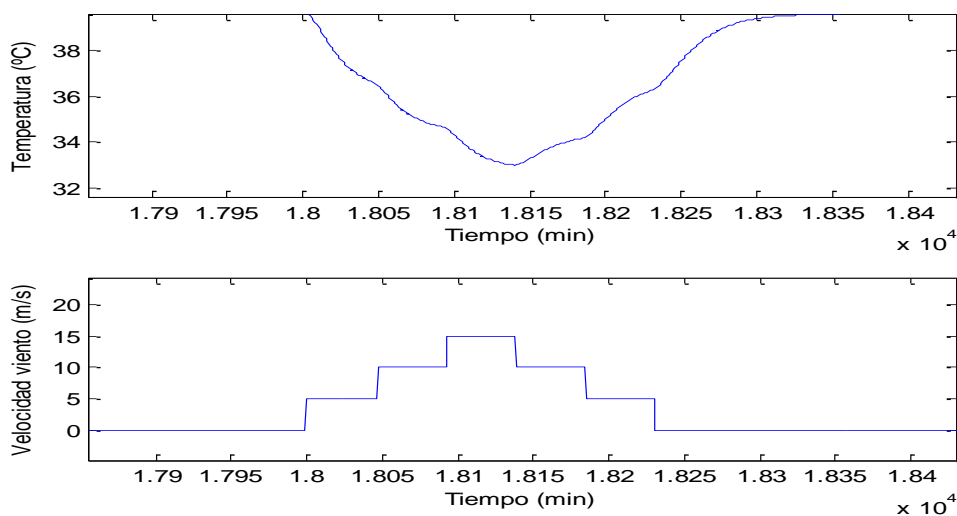


Figura 4.28 Ensayos de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 13

La tabla 4.37 expone los parámetros obtenidos en los ensayos del día 13.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (°Cs/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	0.39565	52.678	1
5-10	0.43571	13.933	1
10-15	0.46152	11.897	1
15-10	0.29672	15.016	1
10-5	0.346424	14.016	1
5-0	0.46926	21.643	1

Tabla 4.37 Resultados de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.38, 4.39 y 4.40):

Ganancia estática K (°Cs/m)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	-0,57998	-0,32353	-0,17111	-0,016645	-0,44395	-0,59232
Día 9	-0,6167	-0,32777	-0,1551	-0,14893	-0,41938	-0,60084
Día 10	-0,58193	-0,3363	-0,18398	-0,14347	-0,54285	-0,58471
Día 11	-0,99865	-0,50624	-0,42292	-0,472	-0,83471	-0,66863
Día 12	-0,98341	-0,44569	-0,39266	-0,45497	-0,65812	-0,65973
Día 13	-0,94794	-0,44569	-0,41819	-0,47221	-0,94264	-0,64048

Tabla 4.38 Resumen de ganancias estáticas de temperatura con entrada de velocidad del viento

Constante de tiempo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	23,328	19,164	22,207	47,84	60,356	31,002
Día 9	25,544	21,311	20,465	43,332	58,083	34,404
Día 10	24,089	21,944	25,439	46,672	62,461	29,235
Día 11	47,612	27,651	27,3	64,959	69,558	27,373
Día 12	43,142	23,445	24,282	54,064	41,953	29,353
Día 13	41,581	23,97	26,347	57,258	64,401	24,157

Tabla 4.39 Resumen de las constantes de tiempo de temperatura con entrada de velocidad del viento

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	1	1	1	1	1	1
Día 9	1	1	1	1	1	1
Día 10	1	1	1	1	1	1
Día 11	1	1	1	1	1	1
Día 12	1	1	1	1	1	1
Día 13	1	1	1	1	1	1

Tabla 4.40 Resumen de tiempos de retardo de temperatura con entrada de velocidad del viento

Las ganancias se encuentran dentro del rango [-0.14347, -0.99865] ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) y las constantes de tiempo en el rango [19.164, 69.558] (min). En este caso, al contrario que en los ensayos vistos anteriormente, la diferencia entre unos días y otros es bastante considerable, al igual que la diferencia entre escalones. Esto se debe a que la respuesta de la temperatura respecto a la velocidad del viento es la más no lineal de todas. No sólo se producen grandes variaciones en los parámetros al cambiar el punto de operación sino también al cambiar la amplitud de la entrada.

Para obtener el modelo, igual que los ensayos realizados en apartados anteriores, se ha realizado la media aritmética de todos los parámetros, obteniendo el siguiente resultado:

$$G(s) = \frac{-0.5039 e^{-s}}{37.647s+1} \quad (4.6)$$

A la vista de los datos, seguramente este sea el modelo peor resultados obtenga en la validación.

4.1.1.2.4 Obtención del modelo de la humedad absoluta exterior.

Aunque en un principio no se pensó en la humedad absoluta exterior como una de las perturbaciones principales del sistema, la humedad relativa del invernadero se ve muy afectada por ella, y también la temperatura, aunque en menor medida.

Para obtener este modelo se han dado escalones en la humedad absoluta de 0.01 y 0.02 de amplitud. La distribución de los escalones se representa en la tabla 4.41.

Día	Amplitud	Escalones					
8	0.01	0.012-0.022	0.022-0.032	0.032-0.042	0.042-0.032	0.032-0.022	0.022-0.012
9	0.01	0.012-0.022	0.022-0.032	0.032-0.042	0.042-0.032	0.032-0.022	0.022-0.012
10	0.01	0.012-0.022	0.022-0.032	0.032-0.042	0.042-0.032	0.032-0.022	0.022-0.012
11	0.02	0.012-0.032	0.032-0.052	0.052-0.072	0.072-0.052	0.052-0.032	0.032-0.012
12	0.02	0.012-0.032	0.032-0.052	0.052-0.072	0.072-0.052	0.052-0.032	0.032-0.012
13	0.02	0.012-0.032	0.032-0.052	0.052-0.072	0.072-0.052	0.052-0.032	0.032-0.012

Tabla 4.41 Distribución de los escalones para la humedad absoluta exterior

Las figuras desde la 4.29 hasta la 4.34 muestran los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la temperatura del invernadero respecto a la humedad absoluta exterior.

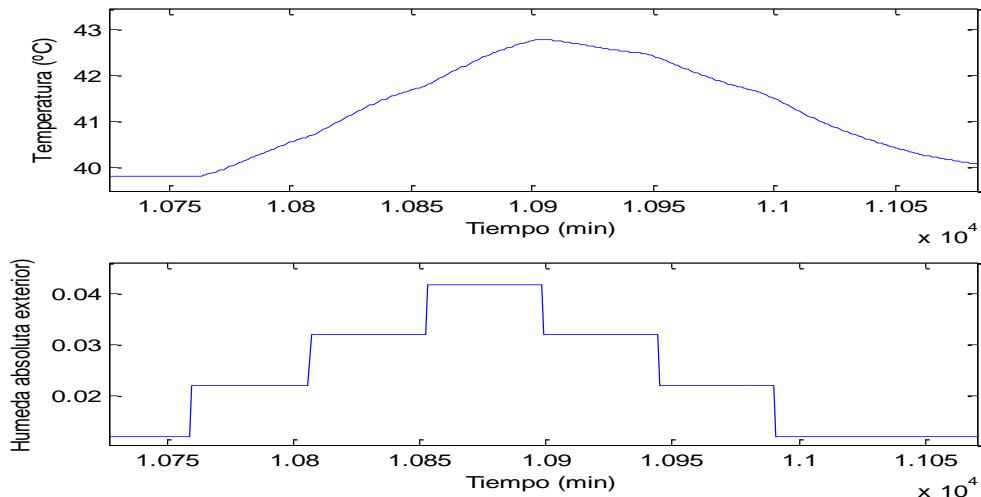


Figura 4.29 Ensayos de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 8

Se puede apreciar que la respuesta corresponde a una función de transferencia de primer orden. Los parámetros obtenidos para este día se muestran en la tabla 4.42:

Escalón	Ganancia estática K (°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.022	100	32.708	1
0.022-0.032	115	23.529	1
0.032-0.042	115	25.269	1
0.042-0.032	50	46.869	1
0.032-0.022	100	30.739	1
0.022-0.012	191.33	50.39	1

Tabla 4.42 Resultados de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 8

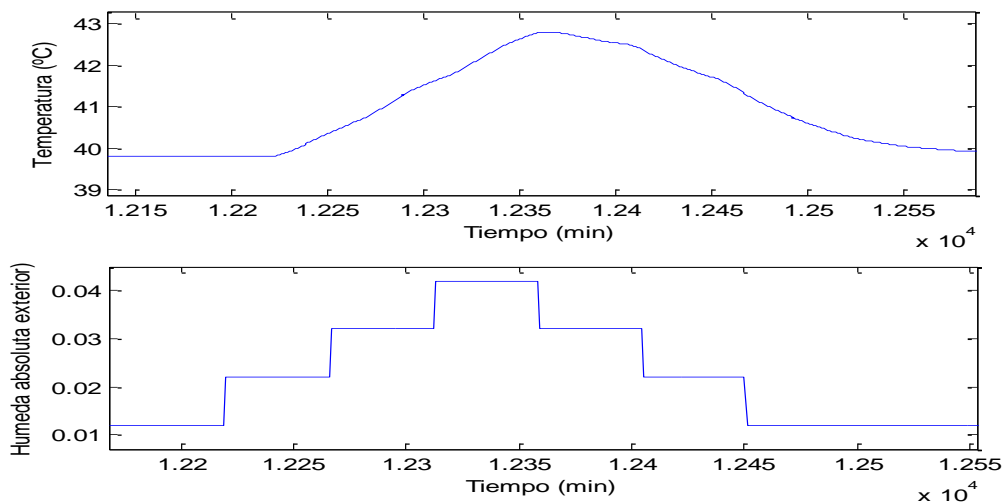


Figura 4.30 Ensayos de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 9

La tabla 4.43 muestra los resultados del día 9 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K (°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.022	100	32.708	1
0.022-0.032	115	23.529	1
0.032-0.042	115	25.269	1
0.042-0.032	50	46.869	1
0.032-0.022	100	30.739	1
0.022-0.012	191.33	50.39	1

Tabla 4.43 Resultados de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 9

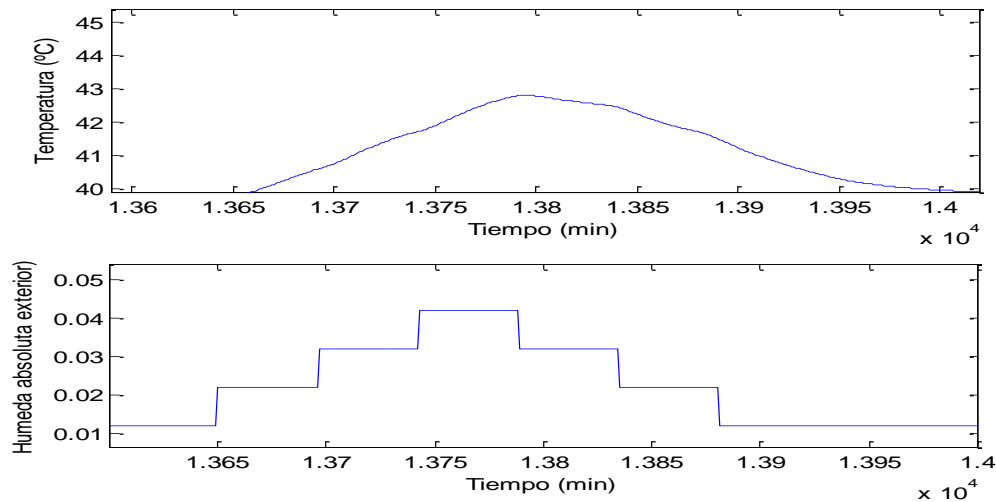


Figura 4.31 Ensayos de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 10

Los resultados obtenidos en los ensayos del día 10 se muestran en la tabla 4.44.

Escalón	Ganancia estática K (°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.022	100	32.708	1
0.022-0.032	115	23.529	1
0.032-0.042	115	25.269	1
0.042-0.032	50	46.869	1
0.032-0.022	100	30.739	1
0.022-0.012	191.33	50.39	1

Tabla 4.44 Resultados de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 10

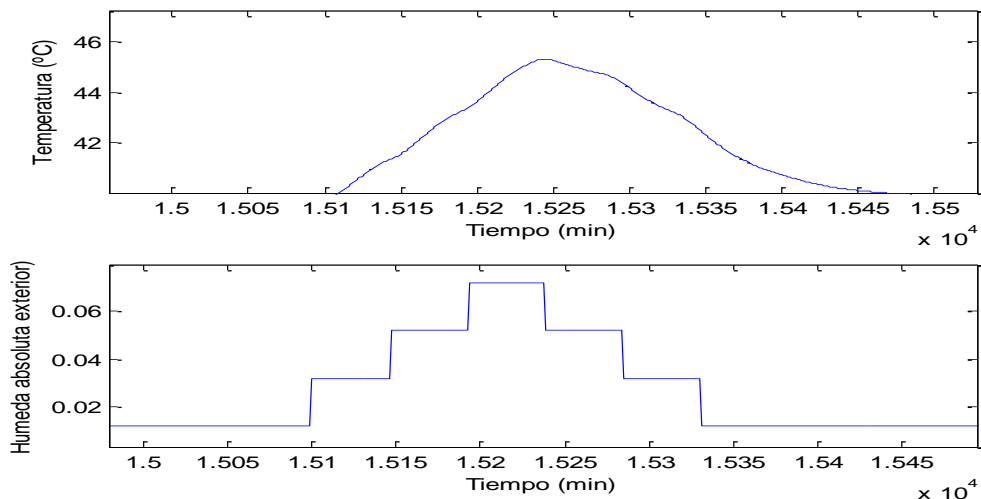


Figura 4.32 Ensayos de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 11

A continuación se presentan los parámetros obtenidos para los ensayos del día 11 (tabla 4.45).

Escalón	Ganancia estática K (°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.032	100	32.708	1
0.032-0.052	115	23.529	1
0.052-0.072	115	25.269	1
0.072-0.052	50	46.869	1
0.052-0.032	100	30.739	1
0.032-0.012	191.33	50.39	1

Tabla 4.45 Resultados de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 11

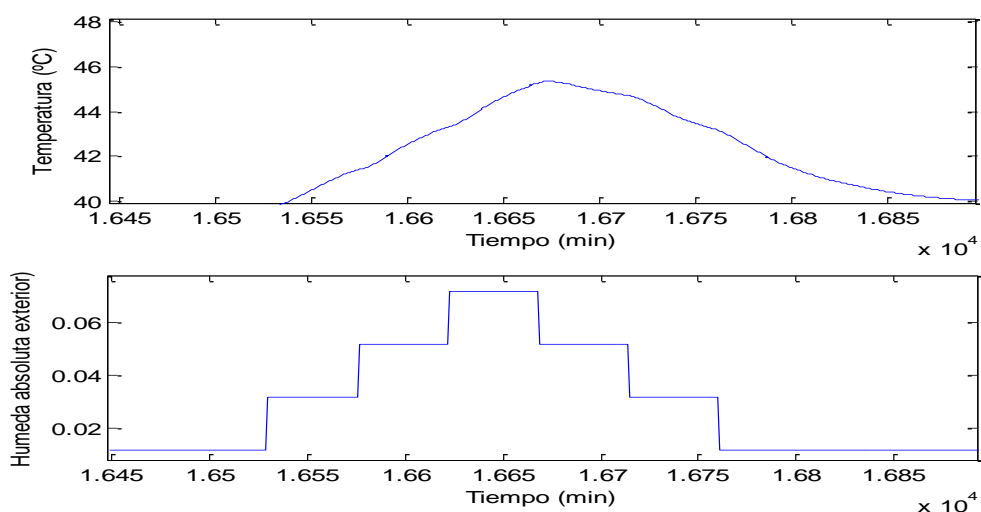


Figura 4.33 Ensayos de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 11

La tabla 4.46 muestra los resultados del día 12 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K (°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.032	100	32.708	1
0.032-0.052	115	23.529	1
0.052-0.072	115	25.269	1
0.072-0.052	50	46.869	1
0.052-0.032	100	30.739	1
0.032-0.012	191.33	50.39	1

Tabla 4.46 Resultados de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 12

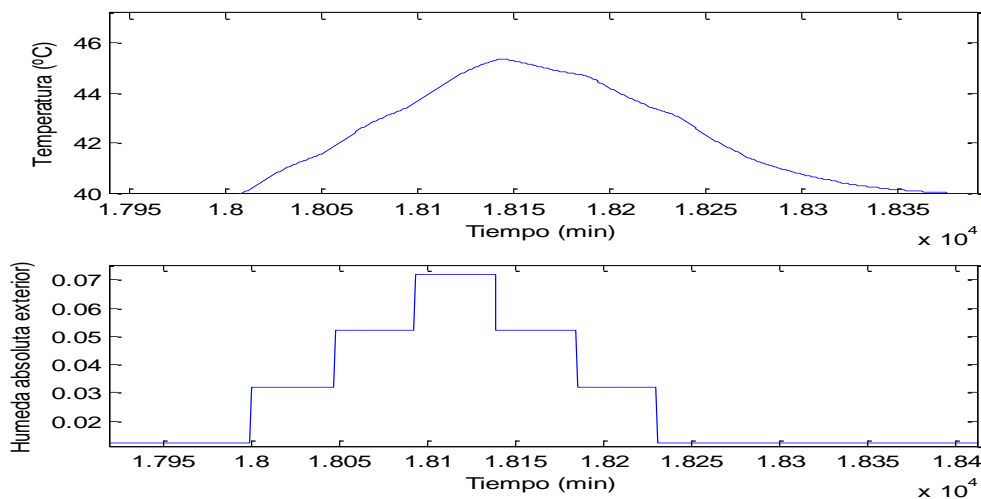


Figura 4.34 Ensayos de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 13

La tabla 4.47 expone los parámetros de los ensayos del día 13 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K (°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.032	100	32.708	1
0.032-0.052	115	23.529	1
0.052-0.072	115	25.269	1
0.072-0.052	50	46.869	1
0.052-0.032	100	30.739	1
0.032-0.012	191.33	50.39	1

Tabla 4.47 Resultados de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.48, 4.49 y 4.50):

Ganancia estática K (°C)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	100	115	115	50	100	191,33
Día 9	100	115	115	50	100	191,33
Día 10	100	115	115	50	100	191,33
Día 11	100	115	115	50	100	191,33
Día 12	100	115	115	50	100	191,33
Día 13	100	115	115	50	100	191,33

Tabla 4.48 Resumen de las ganancias estáticas de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior

Constante de tiempo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	32,708	23,529	25,269	46,869	30,739	50,39
Día 9	32,708	23,529	25,269	46,869	30,739	50,39
Día 10	32,708	23,529	25,269	46,869	30,739	50,39
Día 11	32,708	23,529	25,269	46,869	30,739	50,39
Día 12	32,708	23,529	25,269	46,869	30,739	50,39
Día 13	32,708	23,529	25,269	46,869	30,739	50,39

Tabla 4.49 Resumen de constantes de tiempo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	1	1	1	1	1	1
Día 9	1	1	1	1	1	1
Día 10	1	1	1	1	1	1
Día 11	1	1	1	1	1	1
Día 12	1	1	1	1	1	1
Día 13	1	1	1	1	1	1

Tabla 4.50 Resumen de tiempos de retardo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior

Se pueden apreciar valores de ganancias en el rango [50, 191.33] (°C) y constantes de tiempo en el rango de [23.529, 50.39] (min). Los tiempos de retardo, como en los demás ensayos, siguen siendo de 1 minuto. Se puede observar que las ganancias son mucho mayores que en los demás modelos. Esto tiene sentido, ya que las variaciones de humedad absoluta son muy pequeñas y para que estas sean notables en la temperatura es necesario que la ganancia sea de este orden.

La tabla de las ganancias estáticas muestra que para cada escalón los datos son más similares, en los distintos días, y las diferencias se producen entre distintos escalones. El cuarto escalón es el que más se aleja de los demás valores. Las constantes de tiempo son también bastante

diferentes entre distintos escalones. Esto nos lleva a pensar en la no linealidad del sistema, que provoca todas estas diferencias.

El modelo se ha obtenido como la media aritmética de todos los parámetros obtenidos en los diferentes ensayos:

$$G(s) = \frac{111.89 e^{-s}}{34.917s+1} \quad (4.7)$$

4.1.1.3 Validación de los modelos de temperatura.

En este apartado se realizarán ensayos para comprobar si los modelos se ajustan correctamente a la dinámica real de la temperatura. Para ello, se escogerán los días que no han sido tenidos en cuenta en la obtención de los modelos y se utilizarán dos amplitudes de entrada diferentes para comprobar su efecto, una para los cuatro primeros días y otra para los tres siguientes.

En el caso de haber más de un modelo, se escogerá el que mejor se ajuste.

4.1.1.3.1 Modelo de temperatura con entrada de ventilación.

Como se comentó en el apartado de obtención de modelos, se han elaborado tres posibles modelos para este caso. Uno con los valores medios de todos los escalones, otro con los valores del primer y último escalón y el último se calculó con los datos de los escalones centrales.

Las figuras desde la 4.35 hasta la 4.41 muestran una comparativa de los resultados obtenidos con cada uno de los modelos, ordenados por días.

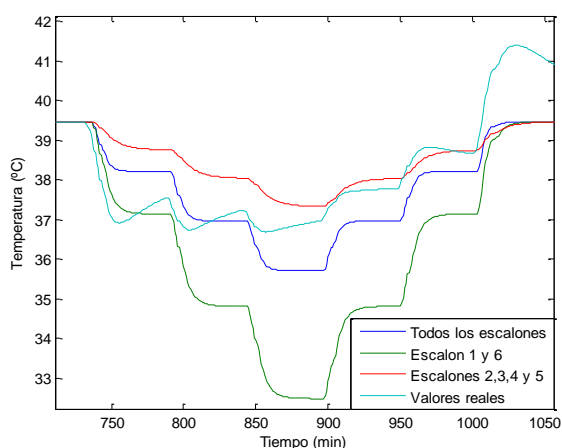


Figura 4.35 Validación del modelo de temperatura con entrada de ventilación. Día 1

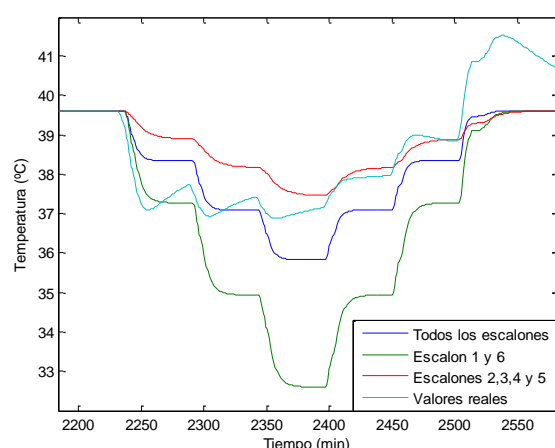


Figura 4.36 Validación del modelo de temperatura con entrada de ventilación. Día 2

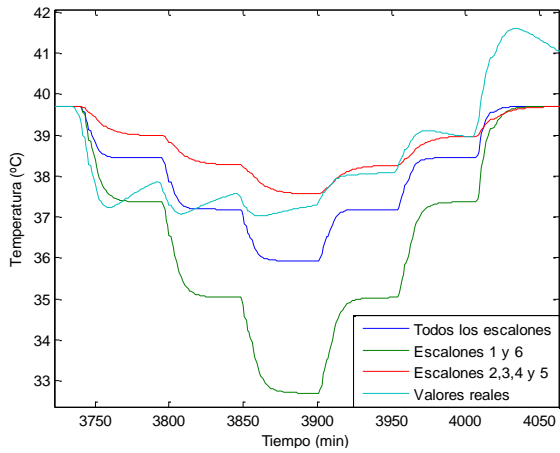


Figura 4.37 Validación del modelo de temperatura con entrada de ventilación. Día 3

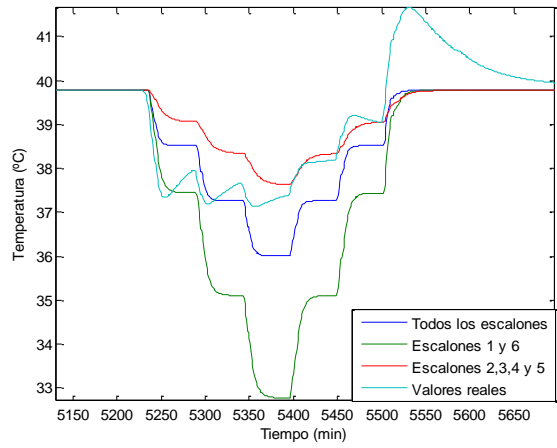


Figura 4.38 Validación del modelo de temperatura con entrada de ventilación. Día 4

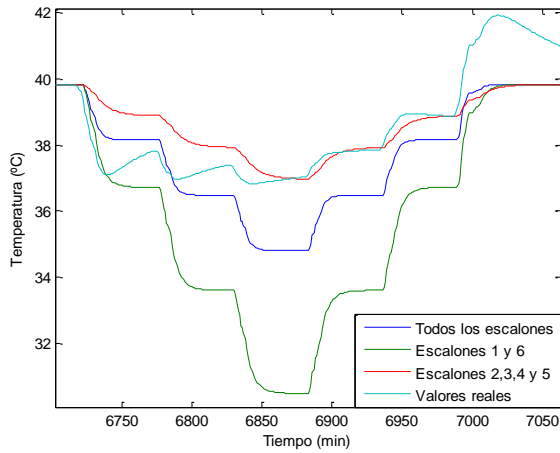


Figura 4.39 Validación del modelo de temperatura con entrada de ventilación. Día 5

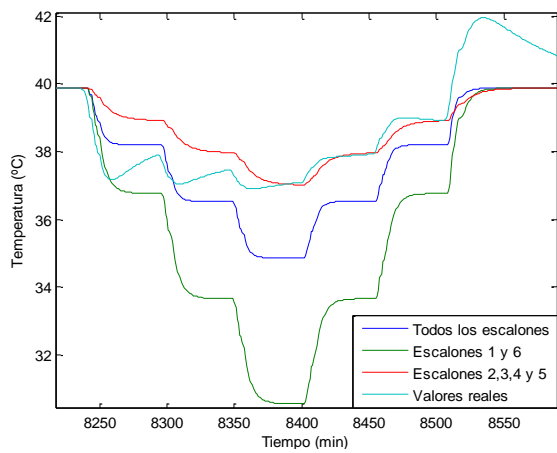


Figura 4.40 Validación del modelo de temperatura con entrada de ventilación. Día 6

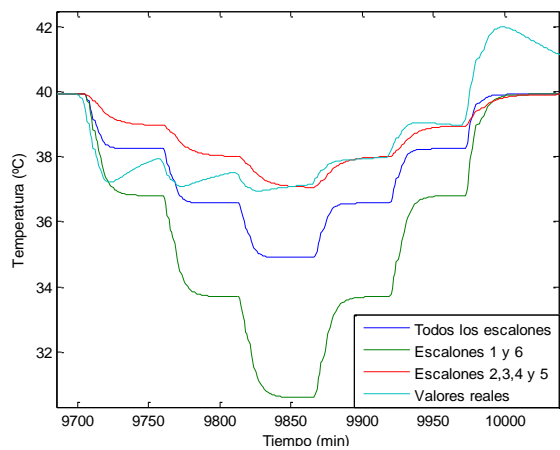


Figura 4.41 Validación del modelo de temperatura con entrada de ventilación. Día 7

Ajuste por mínimos cuadrados		
Modelo de todos los escalones	Modelo de escalones 1 y 6	Modelo de escalones 2, 3, 4 y 5
34.07	-51.43	39.24

Tabla 4.51 Ajuste por mínimos cuadrados de la temperatura a con entrada de ventilación

Cada gráfica muestra la temperatura real (color azul claro), la temperatura simulada con el modelo obtenido a partir de los escalones 1 y 6 (color verde), la temperatura simulada con el modelo obtenido con los modelos intermedios (color rojo) y la temperatura simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color azul oscuro), para cada día.

A simple vista se puede apreciar que el modelo obtenido a partir de los datos de los escalones intermedios (escalones 2, 3, 4 y 5) se aproxima más a la respuesta real del sistema. Sin embargo, para comprobar que es realmente así se ha realizado un ajuste por mínimos cuadrados de todos los modelos y se muestra en la tabla 4.51.

Como se puede comprobar, el modelo que mejor se aproxima a la temperatura real es el obtenido a partir de los escalones intermedios, con un ajuste del 39.24%. Este modelo corresponde a la siguiente ecuación:

$$G_{escalon\ 2-5}(s) = \frac{-0.0477 e^{-s}}{9.957s+1} \quad (4.8)$$

4.1.1.3.2 Modelo de temperatura con entrada de radiación solar.

Las figuras desde la 4.42 hasta la 4.48 muestran los resultados del ajuste del modelo obtenido para la radiación solar, ordenado por días.

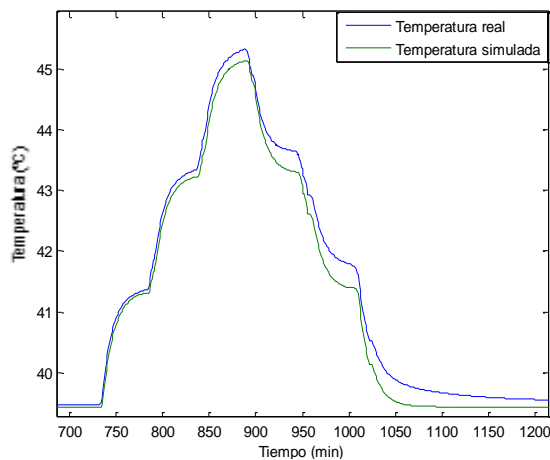


Figura 4.42 Validación del modelo de temperatura con entrada de radiación solar. Día 1

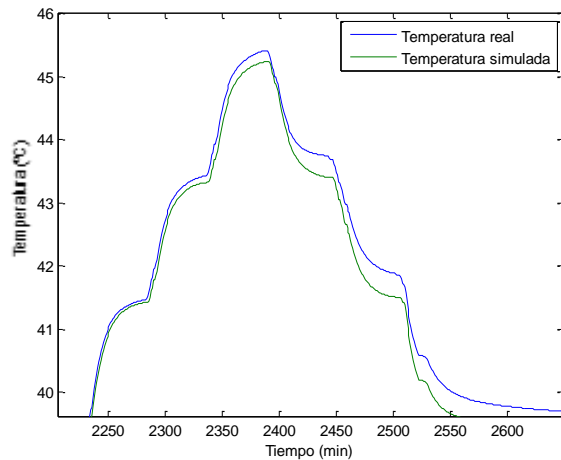


Figura 4.43 Validación del modelo de temperatura con entrada de radiación solar. Día 2

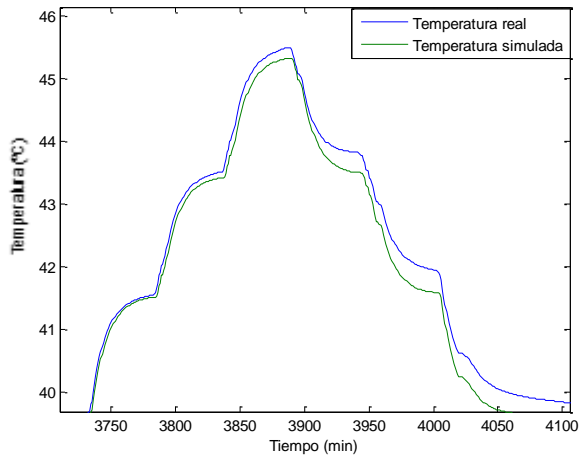


Figura 4.44 Validación del modelo de temperatura con entrada de radiación solar. Día 3

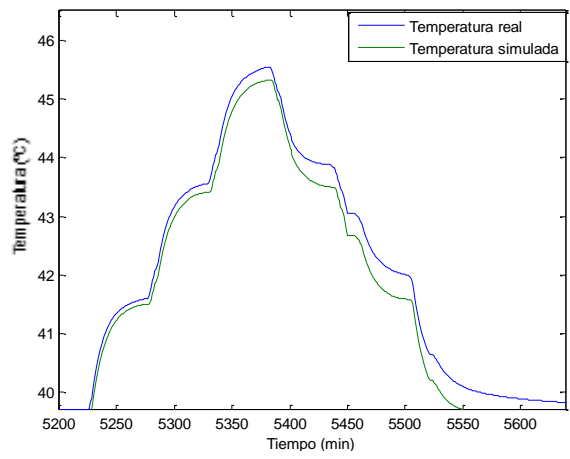


Figura 4.45 Validación del modelo de temperatura con entrada de radiación solar. Día 4

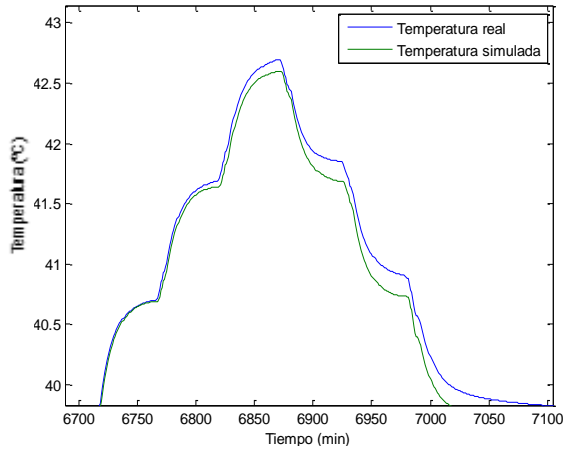


Figura 4.46 Validación del modelo de temperatura con entrada de radiación solar. Día 5

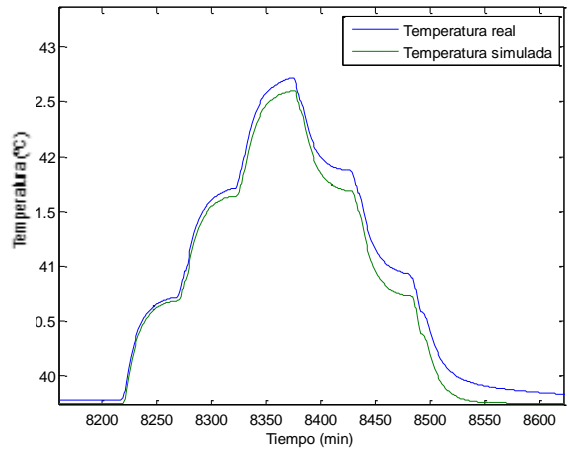


Figura 4.47 Validación del modelo de temperatura con entrada de radiación solar. Día 6

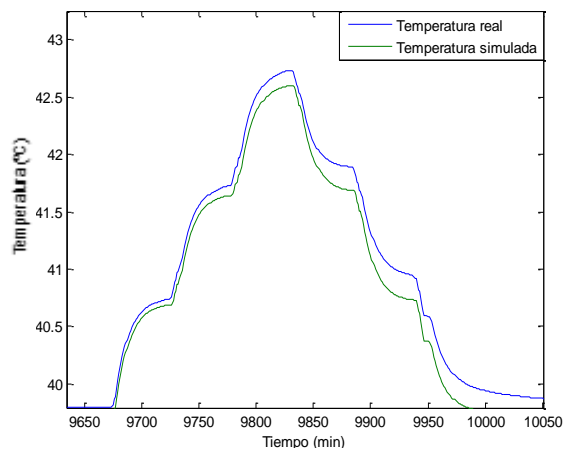


Figura 4.48 Validación del modelo de temperatura con entrada de radiación solar. Día 7

Cada gráfica muestra para un día distinto la temperatura real (color azul) y la temperatura simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color verde).

Los dos primeros escalones se ajustan perfectamente, sin embargo, a partir del tercero se van acumulando los errores generados en los escalones anteriores y se va perdiendo ajuste. El último escalón es el que menos se aproxima a la temperatura real. Estos desajustes son debidos a la no linealidad del sistema, como se comentó durante la obtención del modelo. Aun así, se asemeja bastante a la dinámica real y el ajuste obtenido por mínimos cuadrados es del 90.27%.

4.1.1.3.3 Modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior.

A continuación se muestra los resultados del ajuste del modelo obtenido para la temperatura exterior, ordenado por días (figuras desde la 4.49 hasta la 4.55).

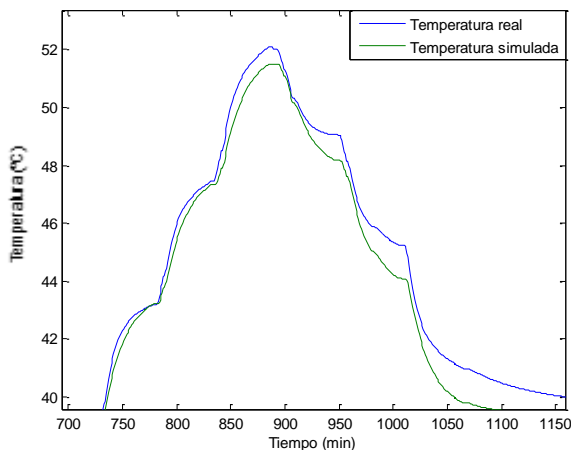


Figura 4.49 Validación del modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 1

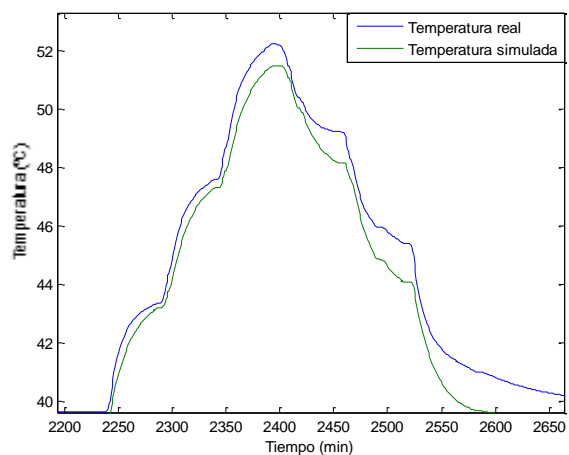


Figura 4.50 Validación del modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 2

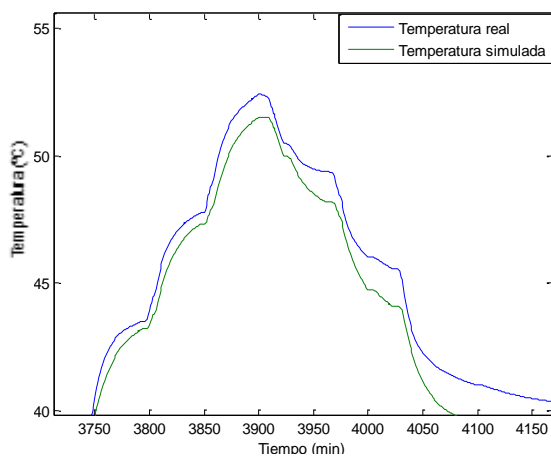


Figura 4.51 Validación del modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 3

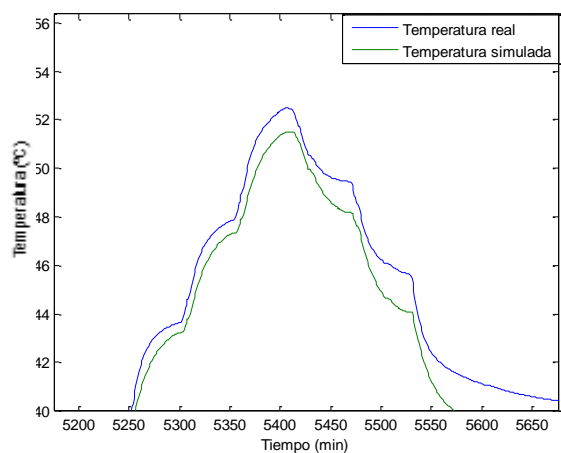


Figura 4.52 Validación del modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 4

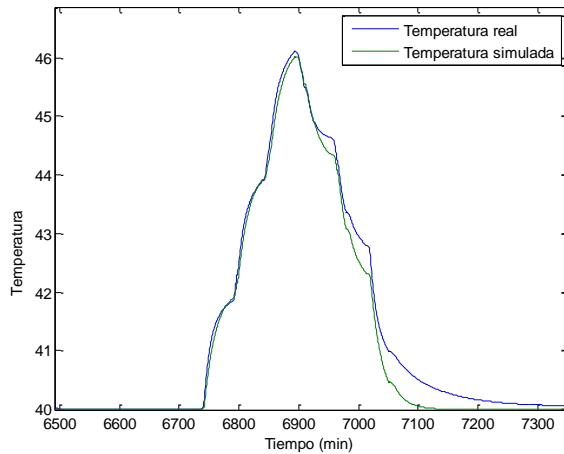


Figura 4.53 Validación del modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 5

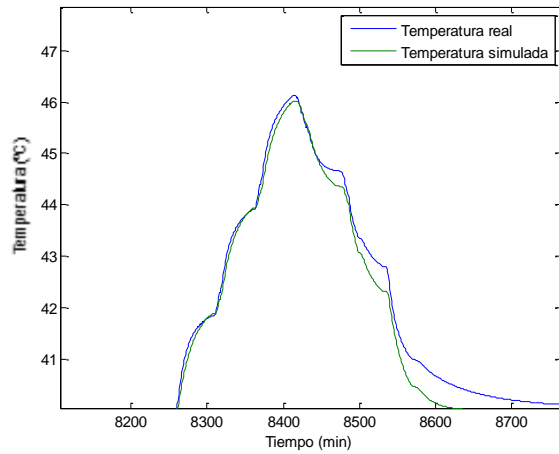


Figura 4.54 Validación del modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 6

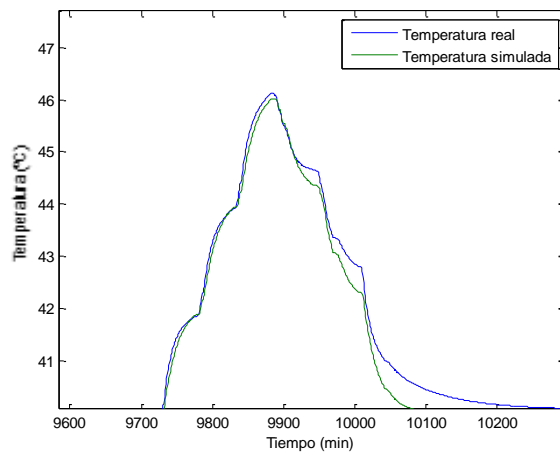


Figura 4.55 Validación del modelo de temperatura con entrada de temperatura exterior. Día 7

Las gráficas representan la temperatura real (color azul) y la temperatura simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color verde), para cada día (días del 1 al 7).

Se puede ver que el modelo se ajusta perfectamente en los dos primeros escalones, incluso el tercero. Pero a partir de ahí, se puede ver la diferencia entre escalones, especialmente en las ganancias. Los tres primeros escalones del modelo real tienen ganancias similares, sin embargo, el cuarto escalón disminuye, el quinto escalón es similar a los tres primeros y el sexto es mucho mayor. Todos estos cambios generan errores en el modelo obtenido, que no tiene en cuenta todas estas variaciones en los parámetros.

Aun así el modelo se ajusta correctamente a la dinámica general del sistema, con un ajuste por mínimos cuadrados del 75.51%.

4.1.1.3.4 Modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento.

A continuación se muestra los resultados del ajuste del modelo obtenido para la velocidad del viento, ordenado por días (figuras desde la 4.56 hasta la 4.62).

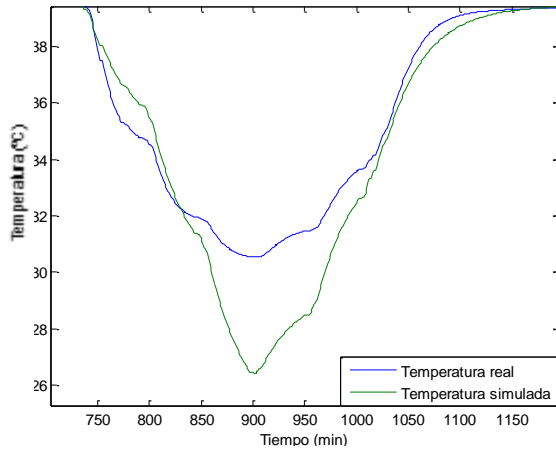


Figura 4.56 Validación del modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 1

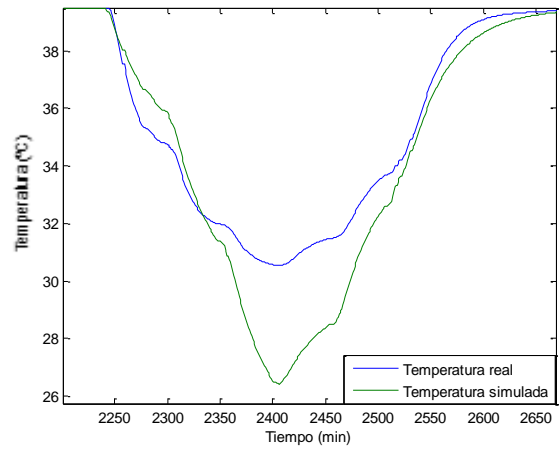


Figura 4.57 Validación del modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 2

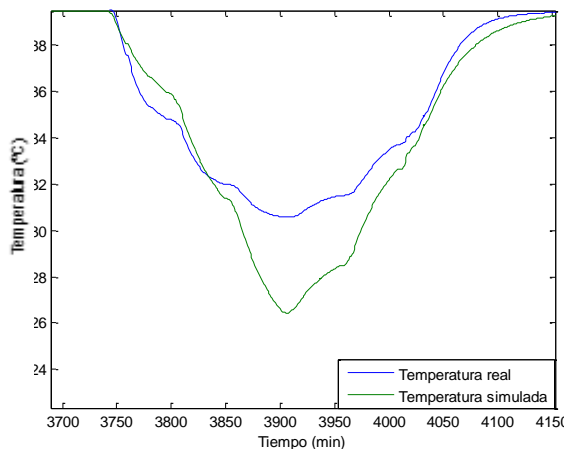


Figura 4.58 Validación del modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 3

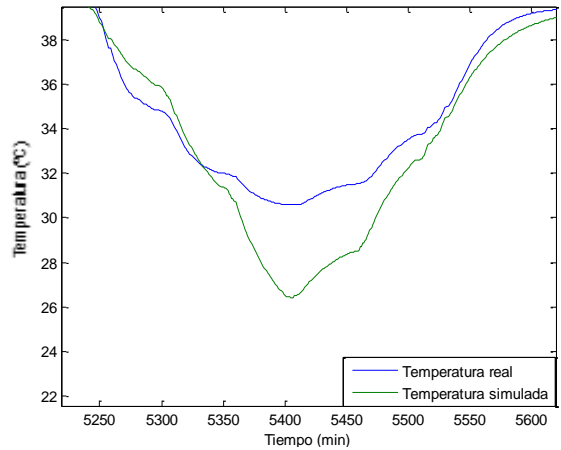


Figura 4.59 Validación del modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 4

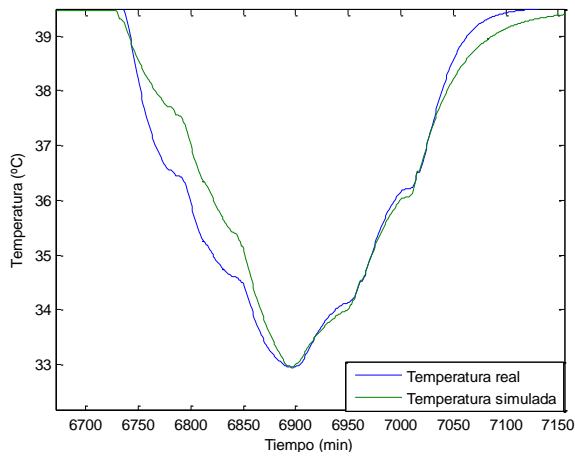


Figura 4.60 Validación del modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 5

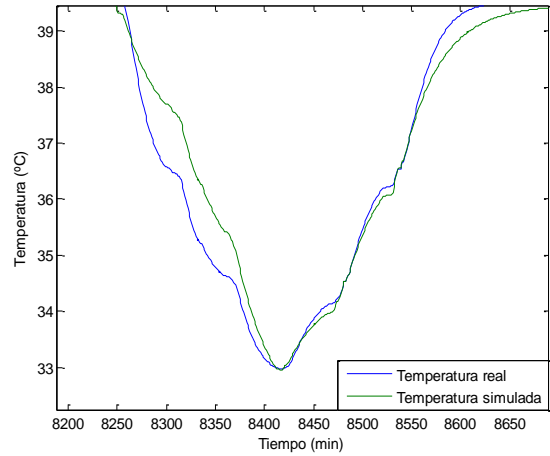


Figura 4.61 Validación del modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 6

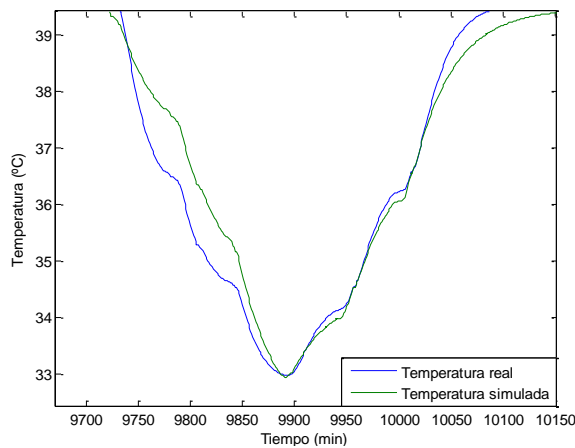


Figura 4.62 Validación del modelo de temperatura con entrada de velocidad del viento. Día 7

Las gráficas representan la temperatura real (color azul) y la temperatura simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color verde), para cada día (días del 1 al 7).

Sin duda, esta es la perturbación con la respuesta más no lineal de todas las que se han estudiado. Los cuatro primeros días tienen amplitudes de entrada distintas a las de los tres siguientes, como se comentó anteriormente. En las otras perturbaciones no supone un gran cambio en la salida, sin embargo, en este caso sí. La diferencia de una amplitud a otra es bastante notable y hace que el ajuste para pequeños incrementos en la velocidad no sea del todo correcto, obteniéndose diferencias de temperatura de unos cuatro grados. Para amplitudes de velocidad del viento mayores, el modelo sí responde de forma similar al sistema real, aunque también se observan diferencias entre escalones, especialmente en los tres primeros, cuya dinámica es bastante más lenta de la que representa el modelo.

El ajuste por mínimos cuadrados obtenido para este modelo es del 69.76%.

4.1.1.3.5 Modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior.

A continuación se muestra los resultados del ajuste del modelo obtenido para la humedad absoluta exterior, ordenado por días (figuras desde la 4.63 hasta la 4.69).

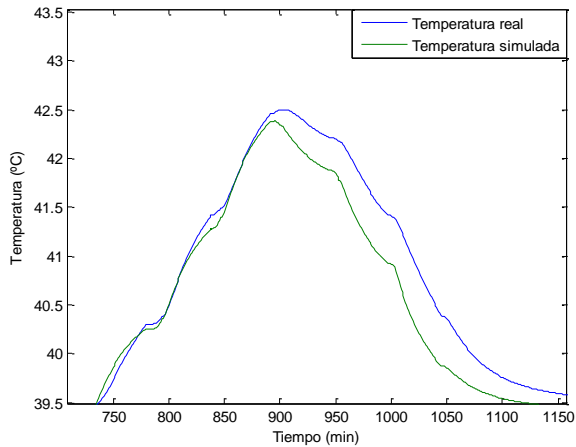


Figura 4.63 Validación del modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 1

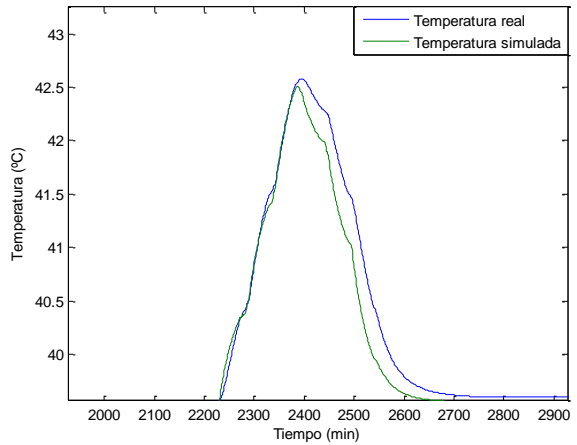


Figura 4.64 Validación del modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 2

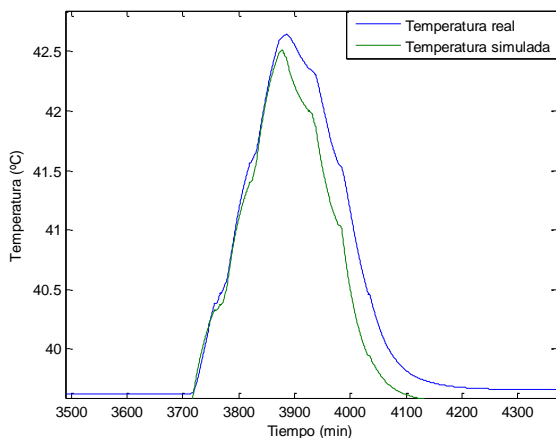


Figura 4.65 Validación del modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 3

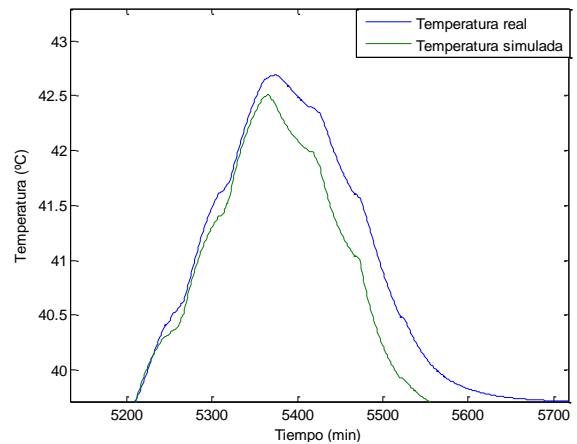


Figura 4.66 Validación del modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 4

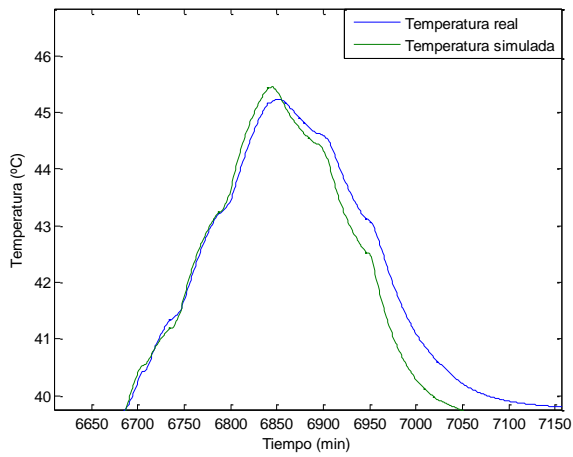


Figura 4.67 Validación del modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 5

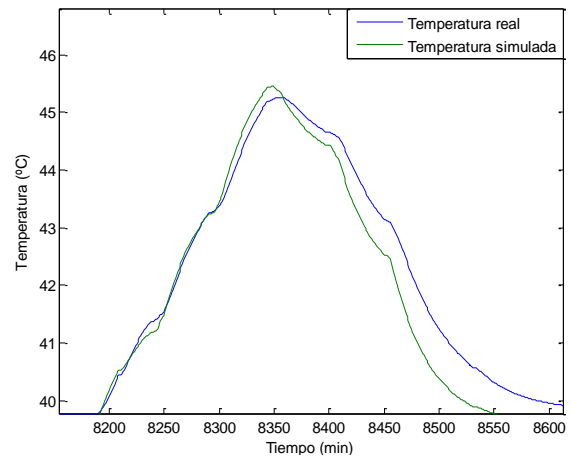


Figura 4.68 Validación del modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 6

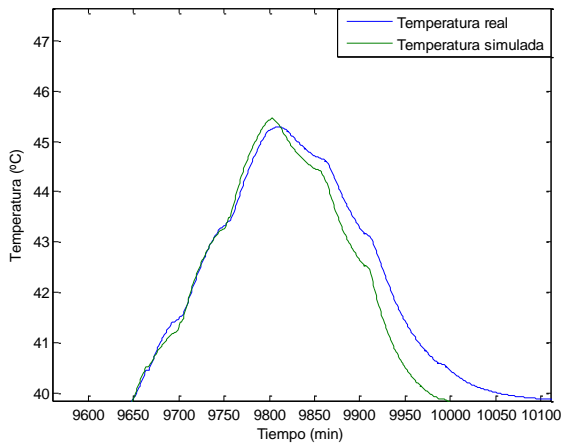


Figura 4.69 Validación del modelo de temperatura con entrada de humedad absoluta exterior. Día 7

Estas gráficas representan la temperatura real (color azul) y la temperatura simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color verde), para cada día (días del 1 al 7).

El modelo se ajusta correctamente en los dos primeros escalones, sin embargo, a partir de aquí, empiezan a producirse desajustes notables. El tercer escalón, dependiendo de la amplitud de la entrada, no llega a la ganancia real o se pasa. El cuarto escalón presenta una dinámica más lenta y con menor amplitud que los demás escalones y provoca un desajuste en los siguientes escalones. Todos estos desajustes se deben a la no linealidad del sistema real.

Aun así el modelo se ajusta correctamente a la dinámica general del sistema, con un ajuste por mínimos cuadrados del 73.42%.

4.1.1.3.6 Validación del modelo de temperatura completo.

Por último, se han desarrollado diversos ensayos con el modelo completo para comprobar si se ajusta a la dinámica principal del sistema. Estos ensayos se han realizado con datos reales de las perturbaciones en el invernadero. A continuación se muestran los resultados obtenidos (figura 4.70):

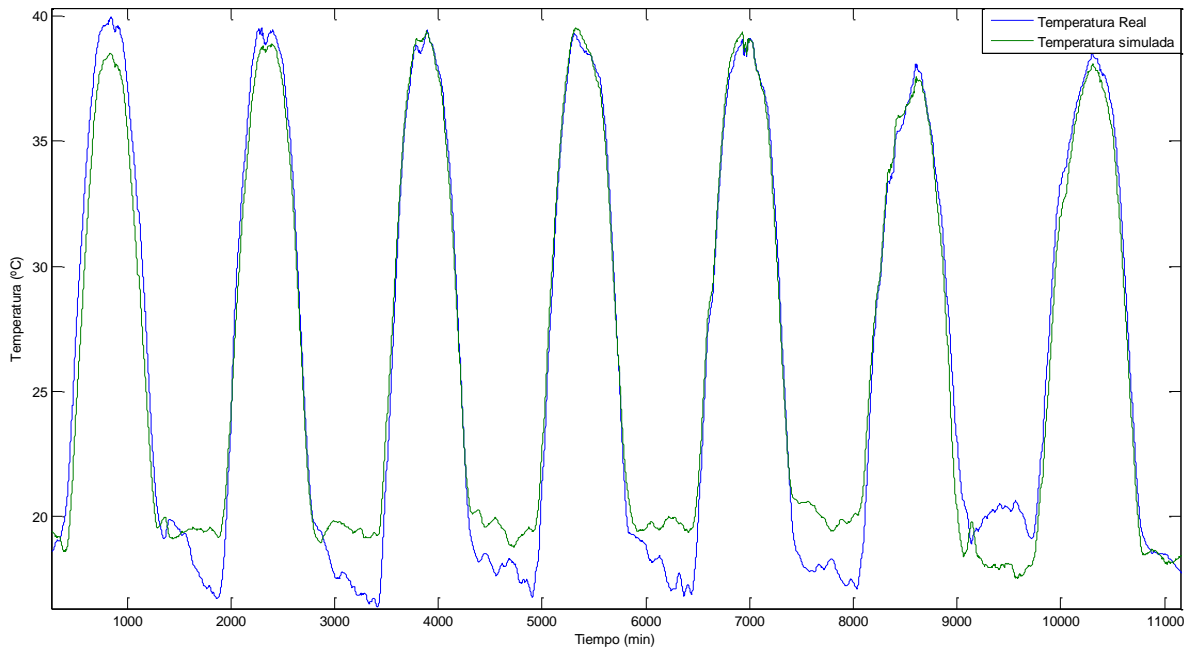


Figura 4.70 Modelo completo de temperatura

Se puede observar cómo el modelo final se ajusta bastante bien a la dinámica real de la temperatura interna del invernadero (error relativo de 0.0633), especialmente en las horas del día, pero presenta algunos problemas de ajuste en las horas de la noche. Esto puede indicar que haya alguna variable o dinámica que afecte especialmente al periodo de la noche y que no se ha tenido en cuenta, sin embargo, este problema no es de interés ya que solo se pretende controlar la temperatura durante las horas de mayor radiación.

4.1.2 Ensayos realizados para la obtención de los modelos que afectan a la humedad relativa.

4.1.2.1 Obtención del modelo principal del sistema.

Al igual que para la obtención del modelo principal de la temperatura, se han dado escalones en la ventilación con amplitudes del 15% y del 20%, en torno al medio día solar. La distribución de los escalones es la misma a la utilizada para la temperatura (tabla 4.52).

Día	Amplitud	Escalones					
8	15%	0-15%	15-30%	30-45%	45-30%	30-15%	15-0%
9	15%	0-15%	15-30%	30-45%	45-30%	30-15%	15-0%
10	15%	0-15%	15-30%	30-45%	45-30%	30-15%	15-0%
11	20%	0-20%	20-40%	40-60%	60-40%	40-20%	20-0%
12	20%	0-20%	20-40%	40-60%	60-40%	40-20%	20-0%
13	20%	0-20%	20-40%	40-60%	60-40%	40-20%	20-0%

Tabla 4.52 Distribución de los escalones para la ventilación

Las figuras desde la 4.71 hasta la 4.76 presentan los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la humedad relativa del invernadero respecto a la ventilación.

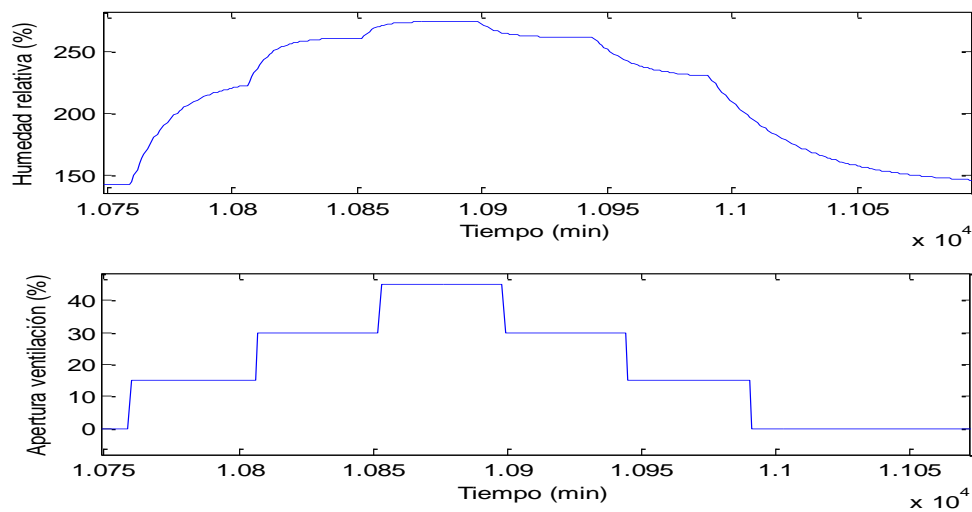


Figura 4.71 Ensayos de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 8

Se observa una respuesta que corresponde a una función de transferencia de primer orden. Los parámetros obtenidos para este día se muestran en la tabla 4.53:

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-15%	7.1756	16.068	1
15-30%	3.2015	8.1342	1
30-45%	1.0819	4.9992	1
45-30%	1.0454	7.6776	1
30-15%	2.7606	15.274	1
15-0%	7.427	33.81	1

Tabla 4.53 Resultados de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 8

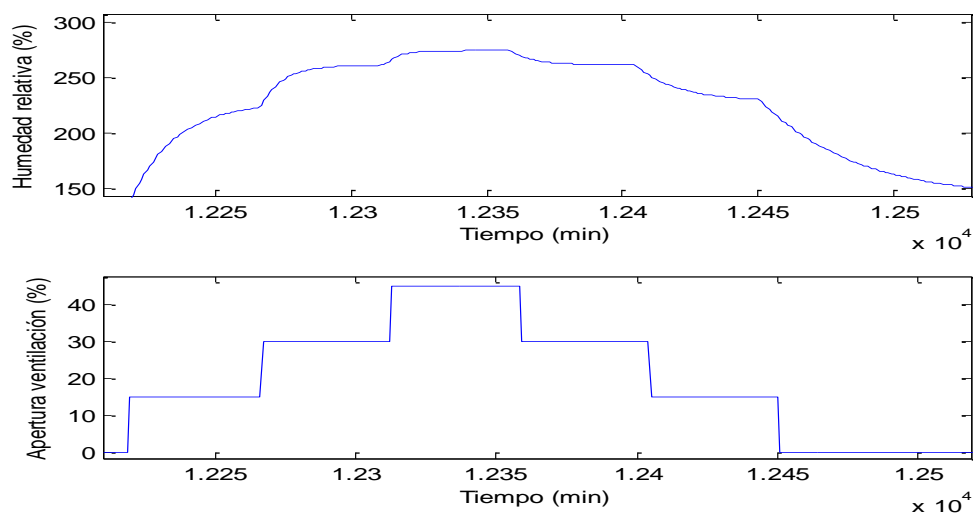


Figura 4.72 Ensayos de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 9

En la siguiente tabla (tabla 4.54) se muestran los resultados del día 9 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-15%	7.1737	16.029	1
15-30%	3.2009	8.1301	1
30-45%	1.0819	5.0062	1
45-30%	1.0451	7.6698	1
30-15%	2.7605	15.265	1
15-0%	7.4302	33.824	1

Tabla 4.54 Resultados de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 9

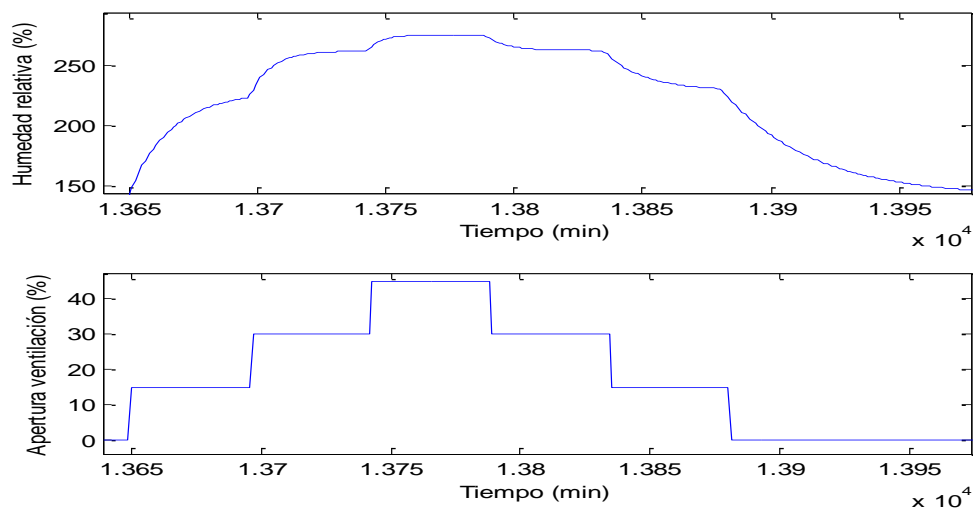


Figura 4.73 Ensayos de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 10

La tabla 4.55 presenta los resultados del día 10 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-15%	7.1786	16.033	1
15-30%	3.2005	8.1276	1
30-45%	1.0804	4.9768	1
45-30%	1.045	7.6675	1
30-15%	2.7606	15.261	1
15-0%	7.4253	33.709	1

Tabla 4.55 Resultados de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 10

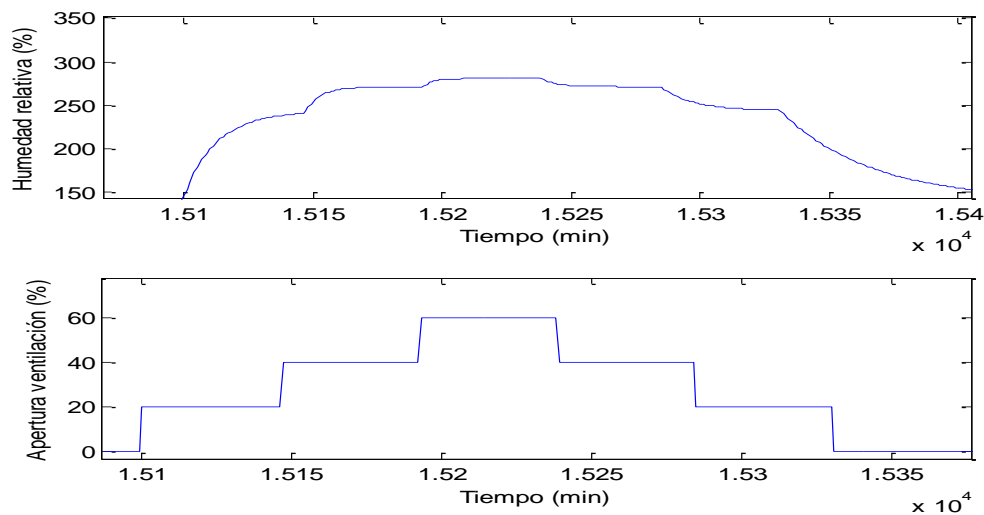


Figura 4.74 Ensayos de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 11

Los parámetros obtenidos para los ensayos del día 11 se presentan en la tabla 4.56.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-20%	6.3494	12.473	1
20-40%	1.8915	5.829	1
40-60%	0.58701	3.5247	1
60-40%	0.57377	5.4692	1
40-20%	1.7036	11.768	1
20-0%	6.4597	33.682	1

Tabla 4.56 Resultados de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 11

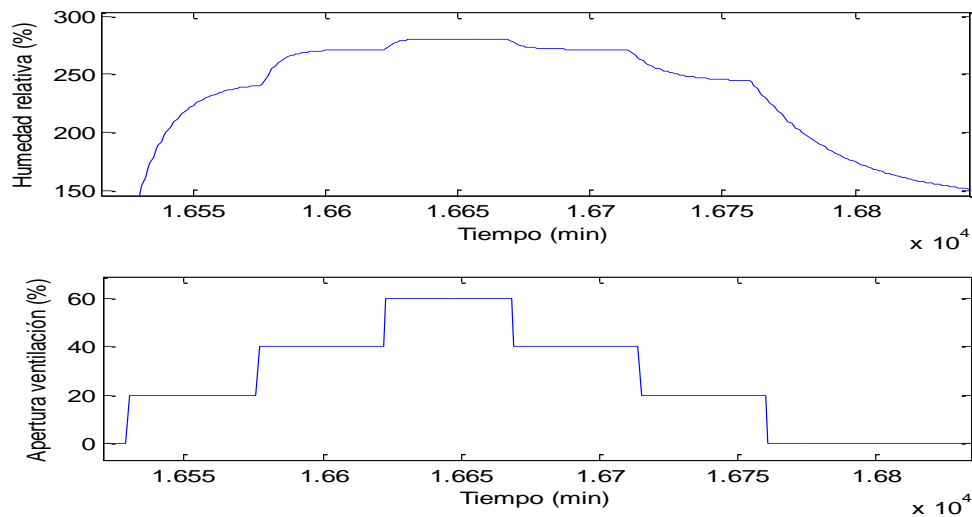


Figura 4.75 Ensayos de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 12

La tabla 4.57 muestra los resultados del día 12 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-20%	6.3494	12.458	1
20-40%	1.8906	5.8205	1
40-60%	0.58675	3.5198	1
60-40%	0.5736	5.4626	1
40-20%	1.7033	11.76	1
20-0%	6.4589	33.643	1

Tabla 4.57 Resultados de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 12

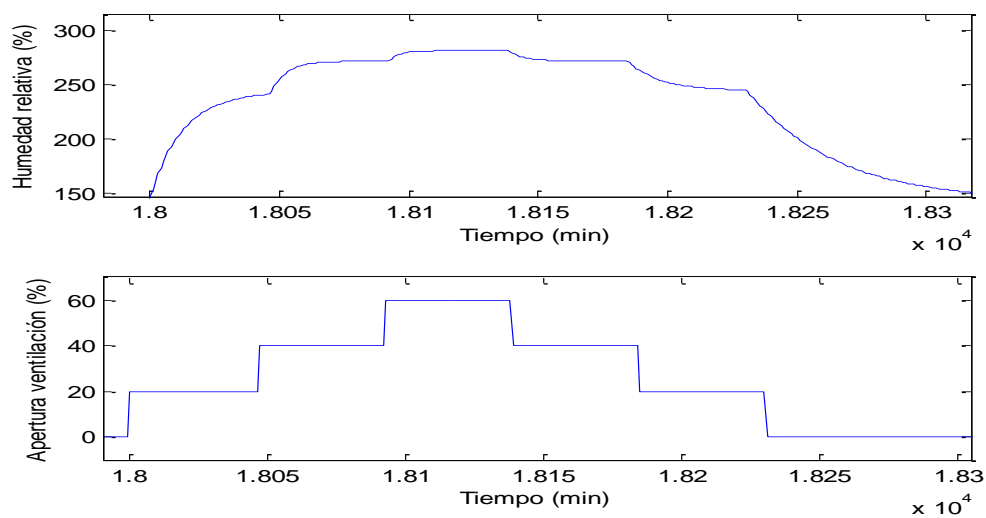


Figura 4.76 Ensayos de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 13

La tabla 4.58 expone los resultados del día 13 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-20%	6.3489	12.446	1
20-40%	1.8905	5.8199	1
40-60%	0.58698	3.5275	1
60-40%	0.57357	5.4645	1
40-20%	1.7033	11.759	1
20-0%	6.4618	33.688	1

Tabla 4.58 Resultados de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.59, 4.60 y 4.61):

Ganancia estática K						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	7,1756	3,2015	1,0819	1,0454	2,7606	7,427
Día 9	7,1737	3,2009	1,0819	1,0451	2,7605	7,4302
Día 10	7,1786	3,2005	1,0804	1,045	2,7606	7,4253
Día 11	6,3494	1,8915	0,58701	0,57377	1,7036	6,4597
Día 12	6,3494	1,8906	0,58675	0,5736	1,7033	6,4589
Día 13	6,3489	1,8905	0,58698	0,57357	1,7033	6,4618

Tabla 4.59 Resumen de ganancias estáticas de humedad relativa con entrada de ventilación

Constante de tiempo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	16,068	8,1342	4,9992	7,6776	15,274	33,81
Día 9	16,029	8,1301	5,0062	7,6698	15,265	33,824
Día 10	16,033	8,1276	4,9768	7,6675	15,261	33,709
Día 11	12,473	5,829	3,5247	5,4692	11,768	33,682
Día 12	12,458	5,8205	3,5198	5,4626	11,76	33,643
Día 13	12,446	5,8199	3,5275	5,4645	11,759	33,688

Tabla 4.60 Resumen de constantes de tiempo de humedad relativa con entrada de ventilación

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	1	1	1	1	1	1
Día 9	1	1	1	1	1	1
Día 10	1	1	1	1	1	1
Día 11	1	1	1	1	1	1
Día 12	1	1	1	1	1	1
Día 13	1	1	1	1	1	1

Tabla 4.61 Resumen de tiempos de retardo de humedad relativa con entrada de ventilación

Las ganancias oscilan en el rango [0.57357, 7.4302] y las constantes de tiempo en el rango [3.5198, 33.824] (min). Los rangos son bastantes amplios debido a las no linealidades del sistema, generando una gran dificultad a la hora de obtener un modelo mediante la curva de reacción. Además, se pueden observar cambios significativos, no solo entre escalones, sino entre días. Esto se debe a que los tres primeros días tienen amplitudes de los escalones distintas a los tres siguientes, y al ser tan no lineal el sistema, esto provoca cambios en los parámetros. Sin embargo, las mayores diferencias siguen mostrándose entre escalones, concretamente, el primer y último escalón, que corresponde a aperturas de la ventilación de 0 a 15 o 20% y de 15 o 20% a 0, tienen dinámicas muy distintas a la del resto de los escalones. Esto sugiere utilizar tres tipos de modelos, como se hizo para la temperatura: un modelo para el primer y último escalón, un modelo para el resto de escalones y el modelo que corresponde a la media de todos los escalones:

$$G_{medio}(s) = \frac{3.3546 e^{-s}}{13.216s+1} \quad (4.9)$$

$$G_{escalon\ 1-6}(s) = \frac{6.8532 e^{-s}}{23.989s+1} \quad (4.10)$$

$$G_{escalon\ 2-5}(s) = \frac{1.6054 e^{-s}}{7.83s+1} \quad (4.11)$$

Lo más óptimo sería conmutar estos dos últimos modelos de manera que cada uno actuase en el instante correspondiente, pero como se comentó anteriormente, debido a la complejidad que supone se utilizará solo el modelo que mejor represente la dinámica real.

4.1.2.2 Obtención de los modelos de las perturbaciones.

En este apartado se mostrarán los ensayos realizados para obtener los modelos de la humedad relativa respecto a las perturbaciones que más afectan al sistema.

4.1.2.2.1 Obtención del modelo de la radiación solar.

La distribución de los escalones es la misma que la utilizada para obtener el modelo de temperatura y se muestra en la tabla 4.62.

Día	Amplitud (W/m^2)	Escalones (W/m^2)					
8	100	900-1000	1000-1100	1100-1200	1200-1100	1100-1000	1000-900
9	100	900-1000	1000-1100	1100-1200	1200-1100	1100-1000	1000-900
10	100	900-1000	1000-1100	1100-1200	1200-1100	1100-1000	1000-900
11	50	900-950	950-1000	1000-1050	1050-1000	1000-950	950-900
12	50	900-950	950-1000	1000-1050	1050-1000	1000-950	950-900
13	50	900-950	950-1000	1000-1050	1050-1000	1000-950	950-900

Tabla 4.62 Distribución de los escalones para la radiación solar

Las figuras de la 4.77 a la 4.82 presentan los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la humedad relativa del invernadero respecto a la radiación solar.

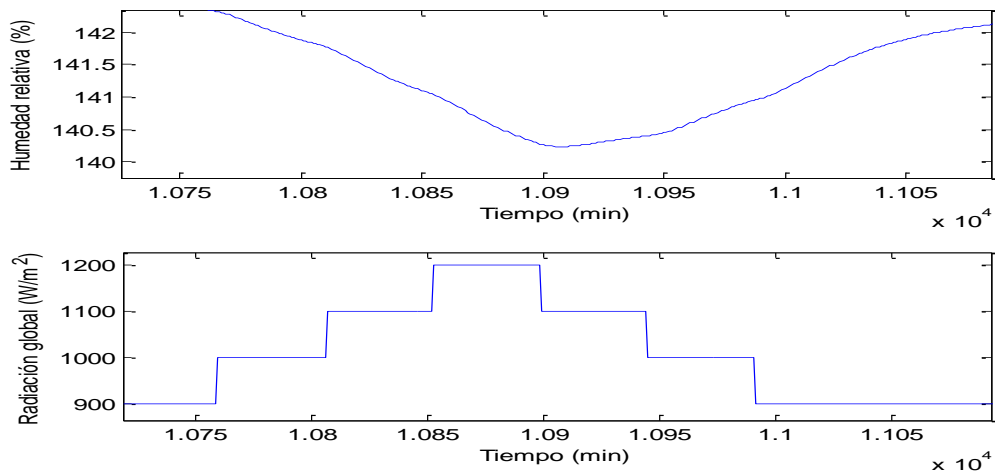


Figura 4.77 Ensayos de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 8

A la vista de los resultados podemos aproximar la respuesta a un primer orden con una constante de tiempo lo suficientemente grande para justificar la respuesta lenta del sistema. Los parámetros obtenidos para este día se muestran a continuación:

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($\%m^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	-0.006	15.264	10.264
1000-1100	-0.01	21.182	6.698
1100-1200	-0.012	25.363	5.745
1200-1100	-0.005	90.68	15
1100-1000	-0.006	10.527	10.155
1000-900	-0.016666	49.421	4.421

Tabla 4.63 Resultados de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 8

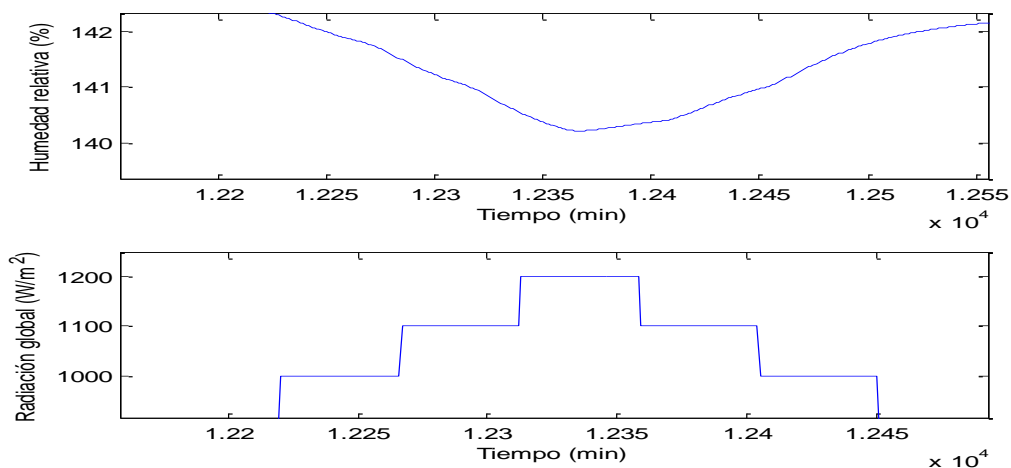


Figura 4.78 Ensayos de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 9

La siguiente tabla (tabla 4.64) presenta los parámetros obtenidos para los ensayos del día 9.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($\%m^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	-0.006	15.264	10.264
1000-1100	-0.01	21.182	6.698
1100-1200	-0.012	25.363	5.745
1200-1100	-0.005	90.68	15
1100-1000	-0.006	10.527	10.155
1000-900	-0.016691	49.877	4.874

Tabla 4.64 Resultados de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 9

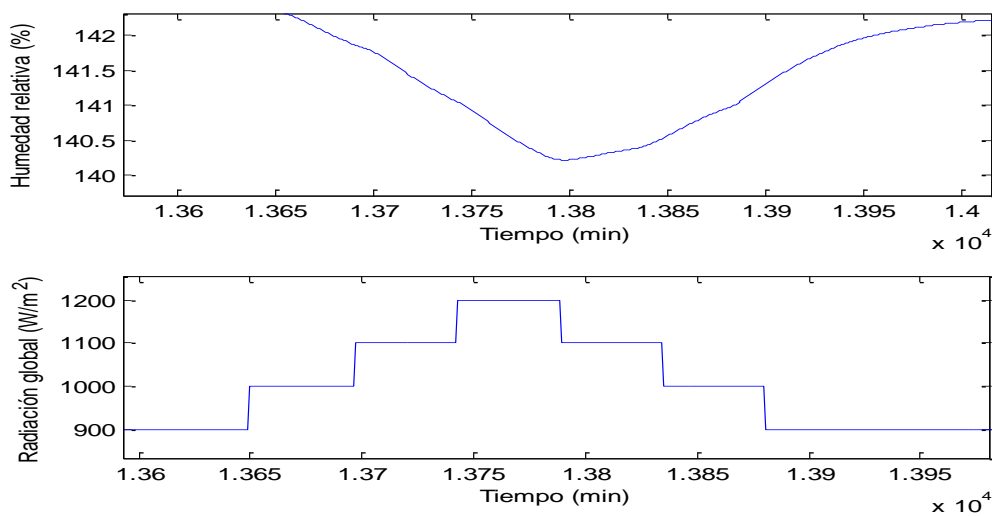


Figura 4.79 Ensayos de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 10

La tabla 4.65 expone los resultados del día 10 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($\%m^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	-0.006	15.264	10.264
1000-1100	-0.01	21.182	6.698
1100-1200	-0.012	25.363	5.745
1200-1100	-0.005	90.68	15
1100-1000	-0.006	10.527	10.155
1000-900	-0.01661	48.823	3.637

Tabla 4.65 Resultados de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 10

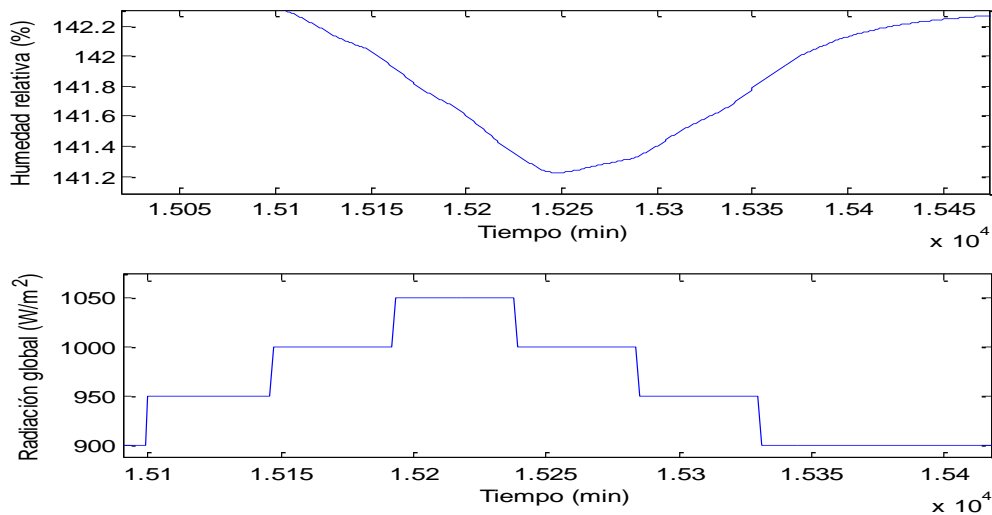


Figura 4.80 Ensayos de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 11

La tabla 4.66 muestra los resultados del día 11 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($\%m^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	-0.006	15.264	10.264
1000-1100	-0.01	21.182	6.698
1100-1200	-0.012	25.363	5.745
1200-1100	-0.005	90.68	15
1100-1000	-0.006	10.527	10.155
1000-900	-0.01661	48.823	3.637

Tabla 4.66 Resultados de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 11

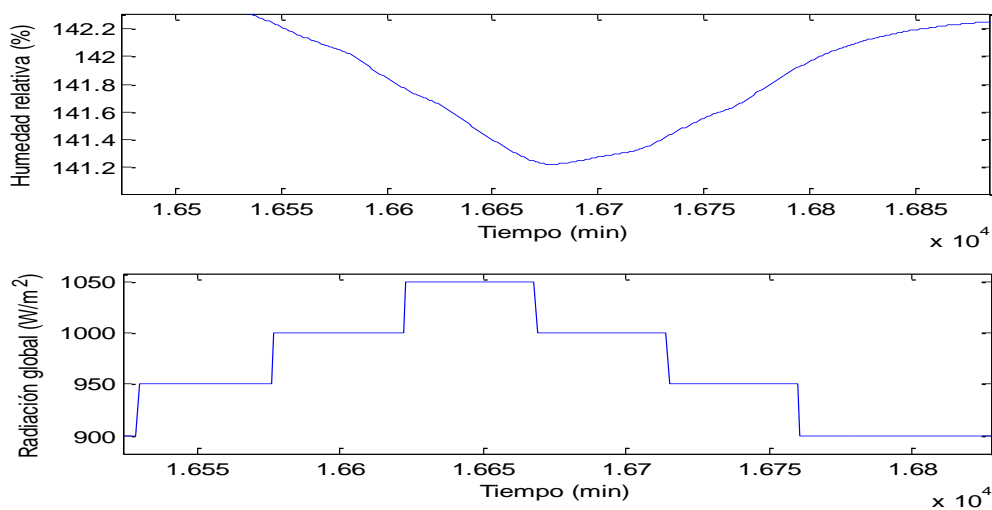


Figura 4.81 Ensayos de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 12

La tabla 4.67 muestra los resultados del día 12 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($\%m^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	-0.006	15.264	10.264
1000-1100	-0.01	21.182	6.698
1100-1200	-0.012	25.363	5.745
1200-1100	-0.005	90.68	15
1100-1000	-0.006	10.527	10.155
1000-900	-0.018	48.823	3.637

Tabla 4.67 Resultados de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 12

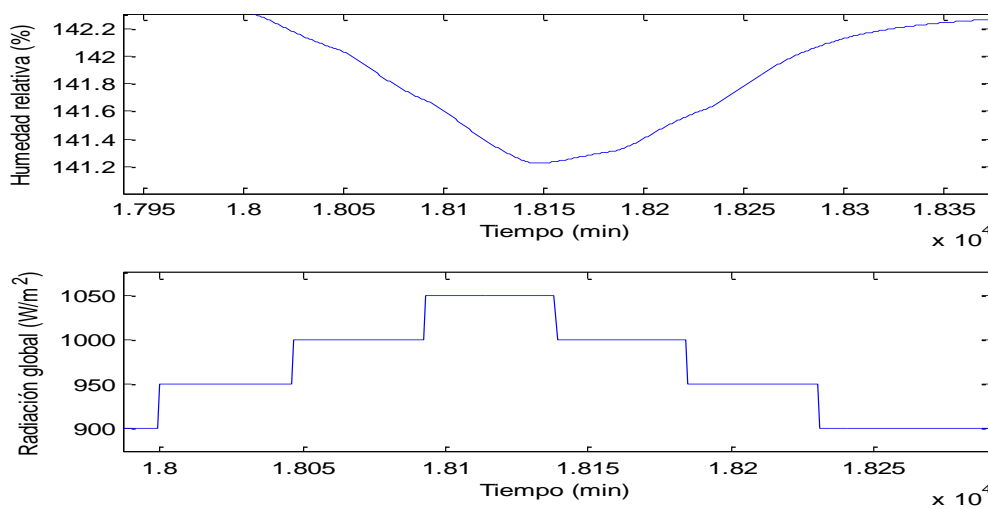


Figura 4.82 Ensayos de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 13

La tabla 4.68 muestra los resultados del día 13 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (W/m^2)	Ganancia estática K ($\%m^2/W$)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
900-1000	-0.006	15.264	10.264
1000-1100	-0.01	21.182	6.698
1100-1200	-0.012	25.363	5.745
1200-1100	-0.005	90.68	15
1100-1000	-0.006	10.527	10.155
1000-900	-0.018	48.823	3.637

Tabla 4.68 Resultados de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.69, 4.70 y 4.71):

Ganancia estática K (%m ² /W)						
	Subida 1	Subida 2	Subida 3	Bajada 1	Bajada 2	Bajada 3
Día 8	-0,006	-0,01	-0,012	-0,005	-0.006	-0,016666
Día 9	-0,006	-0,01	-0,012	-0,005	-0.006	-0,016691
Día 10	-0,006	-0,01	-0,012	-0,005	-0.006	-0.01661
Día 11	-0,006	-0,01	-0,012	-0,005	-0.006	-0.01661
Día 12	-0,006	-0,01	-0,012	-0,005	-0.006	-0.018
Día 13	-0,006	-0,01	-0,012	-0,005	-0.006	-0.018

Tabla 4.69 Resumen de ganancias estáticas de humedad relativa con entrada de radiación solar

Constante de tiempo (min)						
	Subida 1	Subida 2	Subida 3	Bajada 1	Bajada 2	Bajada 3
Día 8	15.264	21.182	25.363	90.68	10.527	49.421
Día 9	15.264	21.182	25.363	90.68	10.527	49.877
Día 10	15.264	21.182	25.363	90.68	10.527	48.823
Día 11	15.264	21.182	25.363	90.68	10.527	48.823
Día 12	15.264	21.182	25.363	90.68	10.527	48.823
Día 13	15.264	21.182	25.363	90.68	10.527	48.823

Tabla 4.70 Resumen de constantes de tiempo de humedad relativa con entrada de radiación solar

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	10.256	6.698	5.745	15	10.155	4.421
Día 9	10.256	6.698	5.745	15	10.155	4.874
Día 10	10.256	6.698	5.745	15	10.155	3.637
Día 11	10.256	6.698	5.745	15	10.155	3.637
Día 12	10.256	6.698	5.745	15	10.155	3.637
Día 13	10.256	6.698	5.745	15	10.155	3.637

Tabla 4.71 Resumen de tiempos de retardo de humedad relativa con entrada de radiación solar

Se pueden apreciar valores de ganancias en el rango [-0.005, -0.018] (%m²/W), constantes de tiempo en el rango de [10.527, 90.68] (min) y tiempos de retardo en el rango [3.637, 15] (min). Dentro de un mismo escalón los parámetros son idénticos o bastantes similares, en el caso de los tiempos de retardo, lo que indica que el sistema no se ve muy afectado por los cambios de amplitud introducidos, aunque sí con cambios en el punto de operación, ya que las principales diferencias se presentan entre los distintos escalones.

El modelo se ha realizado a partir de la media aritmética de todos los parámetros.

$$G(s) = \frac{-0.0093 e^{-8.94s}}{35.352s+1} \quad (4.12)$$

4.1.2.2.2 Obtención del modelo de la temperatura exterior.

Para obtener este modelo se ha modificado la perturbación correspondiente a la temperatura exterior, al igual que para la temperatura, por escalones de 5 y 10 grados de amplitud. La distribución de los escalones se muestra en la tabla 4.72.

Día	Amplitud	Escalones					
8	10 °C	25 – 35°C	35 – 45°C	45 – 55°C	55 – 45°C	45 – 35°C	35 – 25°C
9	10 °C	25 – 35°C	35 – 45°C	45 – 55°C	55 – 45°C	45 – 35°C	35 – 25°C
10	10 °C	25 – 35°C	35 – 45°C	45 – 55°C	55 – 45°C	45 – 35°C	35 – 25°C
11	5 °C	25 – 30°C	30 – 35°C	35 – 40°C	40 – 35°C	35 – 30°C	30 – 25°C
12	5 °C	25 – 30°C	30 – 35°C	35 – 40°C	40 – 35°C	35 – 30°C	30 – 25°C
13	5 °C	25 – 30°C	30 – 35°C	35 – 40°C	40 – 35°C	35 – 30°C	30 – 25°C

Tabla 4.72 Distribución de los escalones para la temperatura exterior

Las figuras desde la 4.83 hasta la 4.88 presentan los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la humedad relativa del invernadero respecto a la temperatura exterior.

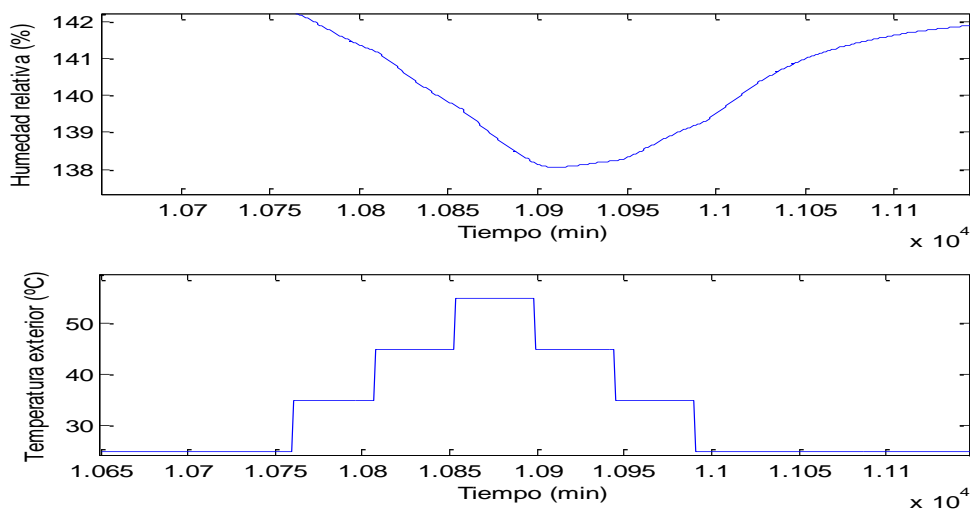


Figura 4.83 Ensayos de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 8

Se puede apreciar que la respuesta corresponde a una función de transferencia de primer orden. Los parámetros obtenidos para este día se muestran a continuación (tabla 4.73):

Escalón (°C)	Ganancia estática K (%/°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-35	-0.12	22.293	9.611
35-45	-0.19	22.371	6.727
45-55	-0.25	25.833	5.438
55-45	-0.08	35.696	15.93
45-35	-0.13	25.909	5.155
35-25	-0.37	67.072	1.723

Tabla 4.73 Resultados de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 8

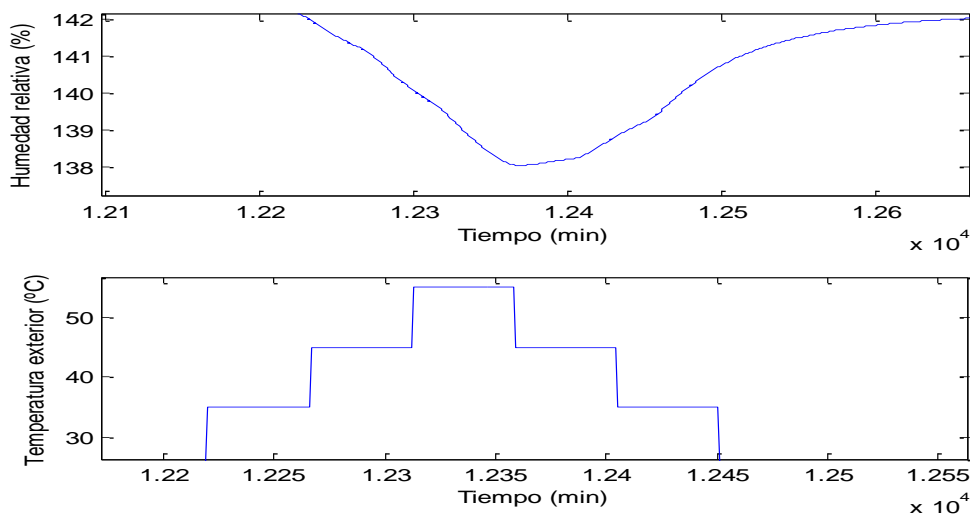


Figura 4.84 Ensayos de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 9

La tabla 4.74 muestra los resultados del día 9 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K (%/°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-35	-0.12	23.293	9.611
35-45	-0.19	24.371	6.727
45-55	-0.25	27.833	5.438
55-45	-0.08	35.696	15.93
45-35	-0.13	30.909	5.155
35-25	-0.37	67.072	4.723

Tabla 4.74 Resultados de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 9

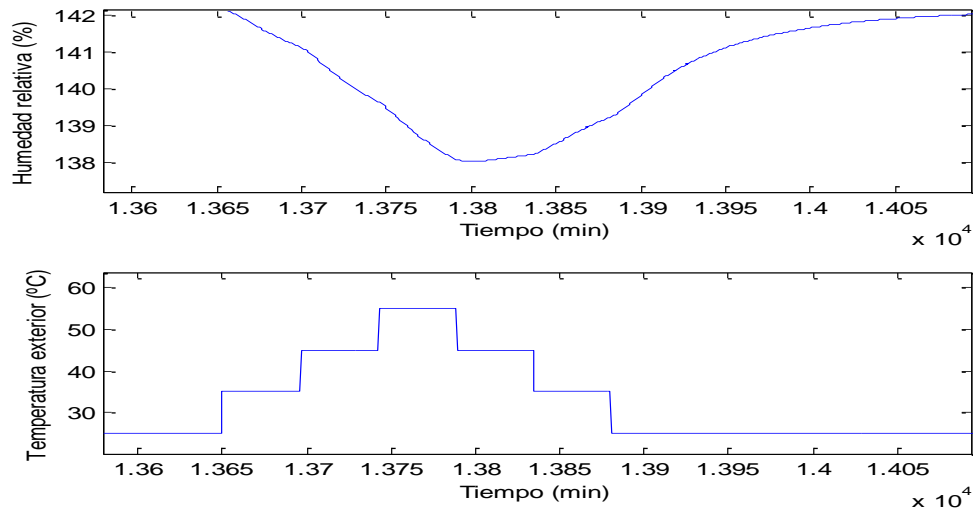


Figura 4.85 Ensayos de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 10

La tabla 4.75 muestra los resultados del día 10 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K (%/°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-35	-0.12	23.293	9.611
35-45	-0.19	24.371	6.727
45-55	-0.25	29.332	5.438
55-45	-0.08	35.696	15.93
45-35	-0.13	35.42	5.155
35-25	-0.37	67.072	4.723

Tabla 4.75 Resultados de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 10

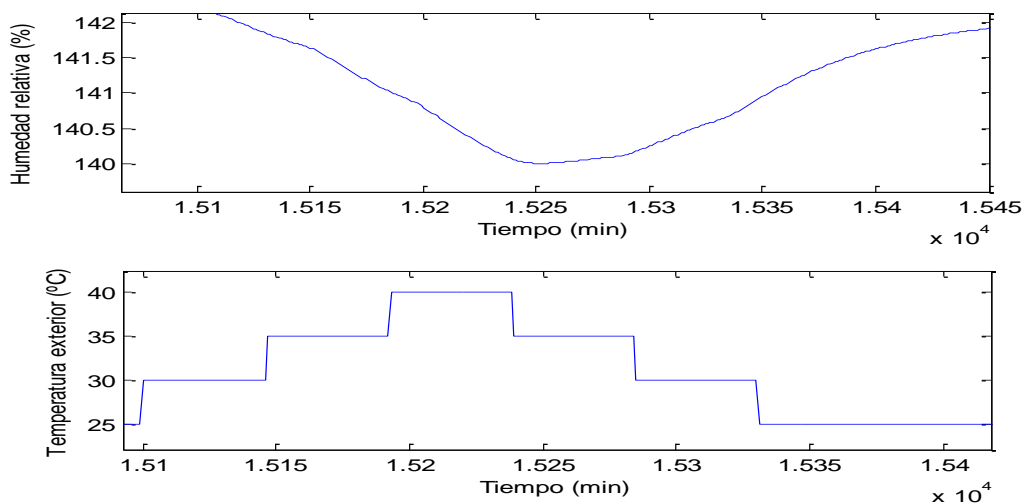


Figura 4.86 Ensayos de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 11

La tabla 4.76 muestra los resultados del día 11 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K (%/°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-30	-0.12	23.293	9.611
30-35	-0.19	24.371	6.727
35-40	-0.25	29.332	5.438
40-35	-0.08	35.696	15.93
35-30	-0.13	35.42	5.155
30-25	-0.4	67.072	4.723

Tabla 4.76 Resultados de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 11

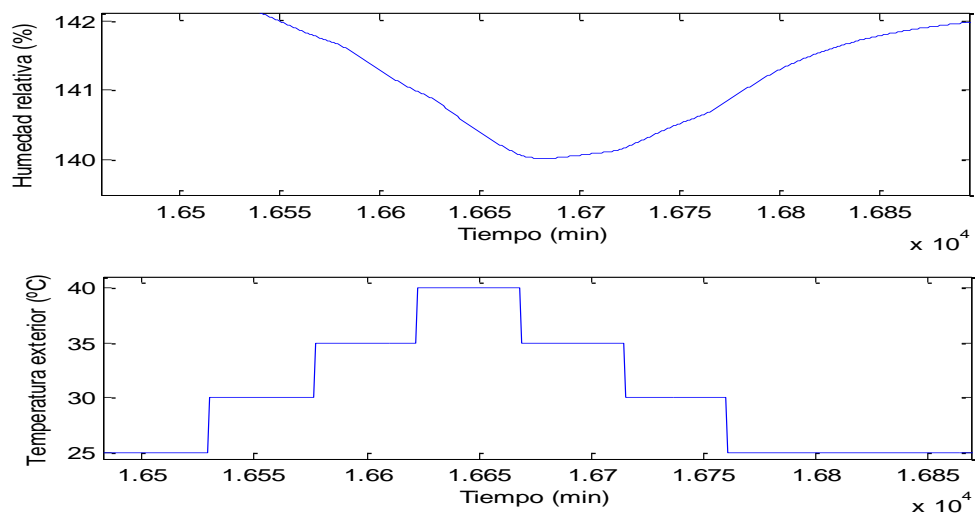


Figura 4.87 Ensayos de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 12

La tabla 4.77 muestra los resultados del día 12 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K (%/°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-30	-0.12	23.293	9.611
30-35	-0.19	24.371	6.727
35-40	-0.25	29.332	5.438
40-35	-0.08	35.696	15.93
35-30	-0.13	35.42	5.155
30-25	-0.4	67.072	4.723

Tabla 4.77 Resultados de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 12

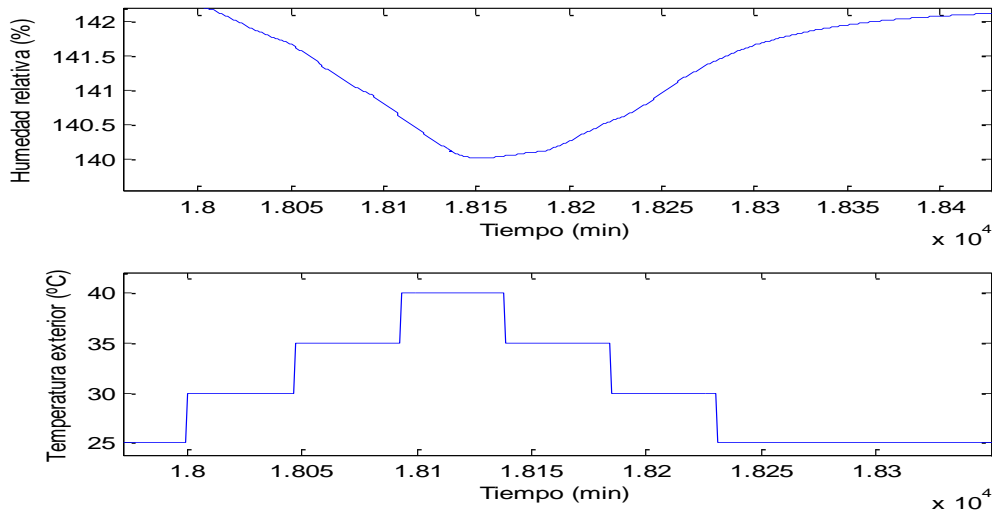


Figura 4.88 Ensayos de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 13

La tabla 4.78 muestra los resultados del día 13 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (°C)	Ganancia estática K (%/°C)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
25-30	-0.12	23.293	9.611
30-35	-0.19	24.371	6.727
35-40	-0.25	29.332	5.438
40-35	-0.08	35.696	15.93
35-30	-0.13	35.42	5.155
30-25	-0.4	67.072	4.723

Tabla 4.78 Resultados de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.79, 4.80 y 4.81):

Ganancia estática K (%/°C)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	-0,12	-0,19	-0,25	-0,08	-0,13	-0,37
Día 9	-0,12	-0,19	-0,25	-0,08	-0,13	-0,37
Día 10	-0,12	-0,19	-0,25	-0,08	-0,14	-0,37
Día 11	-0,12	-0,19	-0,25	-0,08	-0,14	-0,4
Día 12	-0,12	-0,19	-0,25	-0,08	-0,14	-0,4
Día 13	-0,12	-0,19	-0,25	-0,08	-0,14	-0,4

Tabla 4.79 Resumen de ganancias estáticas de humedad relativa con entrada de temperatura exterior

Constante de tiempo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	22,293	22,371	25,833	35,696	25,909	67,072
Día 9	23,293	24,371	27,833	35,696	30,909	67,072
Día 10	23,293	24,371	29,332	35,696	35,42	67,072
Día 11	23,293	24,371	29,332	35,696	35,42	67,072
Día 12	23,293	24,371	29,332	35,696	35,42	67,072
Día 13	23,293	24,371	29,332	35,696	35,42	67,072

Tabla 4.80 Resumen de constantes de tiempo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	9,611	6,727	5,438	15,93	5,155	1,723
Día 9	9,611	6,727	5,438	15,93	5,155	4,723
Día 10	9,611	6,727	5,438	15,93	5,155	4,723
Día 11	9,611	6,727	5,438	15,93	5,155	4,723
Día 12	9,611	6,727	5,438	15,93	5,155	4,723
Día 13	9,611	6,727	5,438	15,93	5,155	4,723

Tabla 4.81 Resumen de tiempos de retardo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior

Las ganancias oscilan entre $-0,08\%/^{\circ}\text{C}$ (en el cuarto escalón) y $-0,37\%/^{\circ}\text{C}$ (en el último escalón). Las constantes de tiempo toman valores entre 23.293 y 67.072 minutos y los tiempos de retardo entre 1.723 y 15.93 minutos. Como ocurría en los ensayos anteriores, las ganancias y las constantes de tiempo son similares dentro de un mismo escalón, pero de un escalón a otro se aprecia bastante diferencia. Esto se debe a que la humedad relativa no es lineal respecto a la temperatura exterior y genera diferencias en los parámetros. Las diferencias entre las distintas amplitudes utilizadas (los 4 primeros días tienen amplitudes de entrada distintas a las de los 3 días siguientes) parecen no afectar demasiado a la salida.

Para la obtención del modelo se han utilizado los valores medios de todos los parámetros, obteniendo el siguiente resultado:

$$G(s) = \frac{-0.1936 e^{-7.85s}}{35.252s+1} \quad (4.13)$$

4.1.2.2.3 Obtención del modelo de la velocidad del viento.

Para obtener este modelo se ha modificado la velocidad del viento por escalones de 5 m/s y 10m/s de amplitud. Sin embargo, se ha visto que en 10 m/s el sistema satura por lo que se ha utilizado solo la amplitud de 5 m/s. Además, tras realizar varios ensayos se ha comprobado que sólo el primer y último escalón modifican la salida, por tanto, se han reducido la cantidad de escalones a 2.

Día	Amplitud	Escalones	
8	5 m/s	0-5m/s	5-0m/s
9	5 m/s	0-5m/s	5-0m/s
10	5 m/s	0-5m/s	5-0m/s
11	5 m/s	0-5m/s	5-0m/s
12	5 m/s	0-5m/s	5-0m/s
13	5 m/s	0-5m/s	5-0m/s

Tabla 4.82 Distribución de los escalones para la velocidad del viento

Las figuras desde la 4.89 hasta la 4.94 muestran los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la humedad relativa del invernadero respecto a la velocidad del viento.

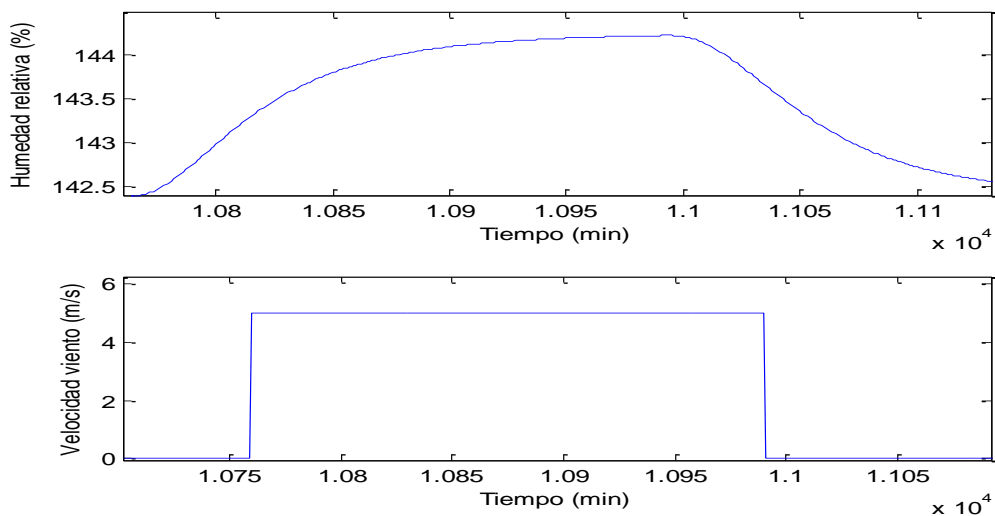


Figura 4.89 Ensayos de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 8

La respuesta corresponde a una función de transferencia de primer orden. Los parámetros obtenidos para este día se muestran a continuación (tabla 4.83):

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (%s/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	0.3791	54.902	18.49
5-0	0.3721	56.308	22.756

Tabla 4.83 Resultados de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 8

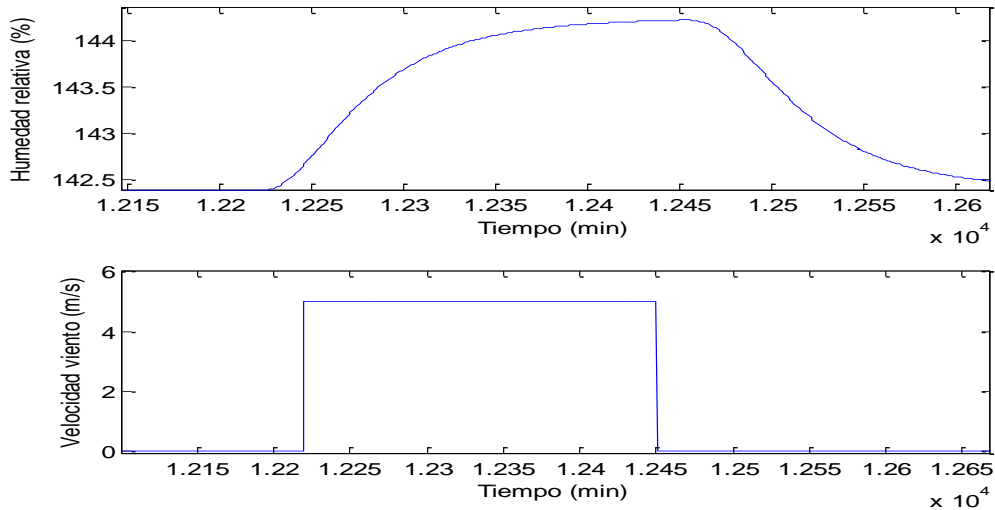


Figura 4.90 Ensayos de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 9

La tabla 4.84 muestra los resultados del día 9 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (%s/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	0.37846	54.420	18.57
5-0	0.370	55.462	22.895

Tabla 4.84 Resultados de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 9

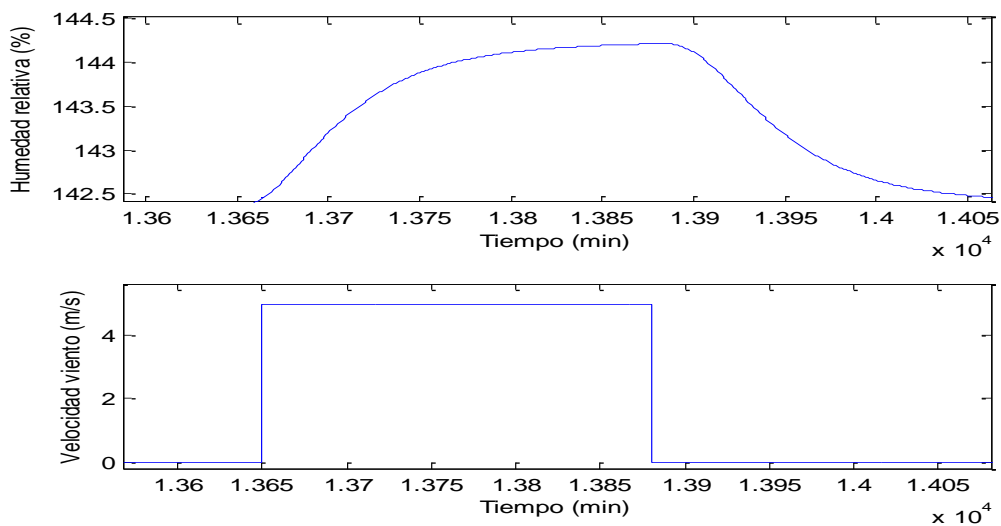


Figura 4.91 Ensayos de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 10

La siguiente tabla (tabla 4.85) presenta los resultados obtenidos para los 2 ensayos realizados el día 10.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (%s/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	0.3798	54.924	18.49
5-0	0.37098	55.872	22.825

Tabla 4.85 Resultados de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 10

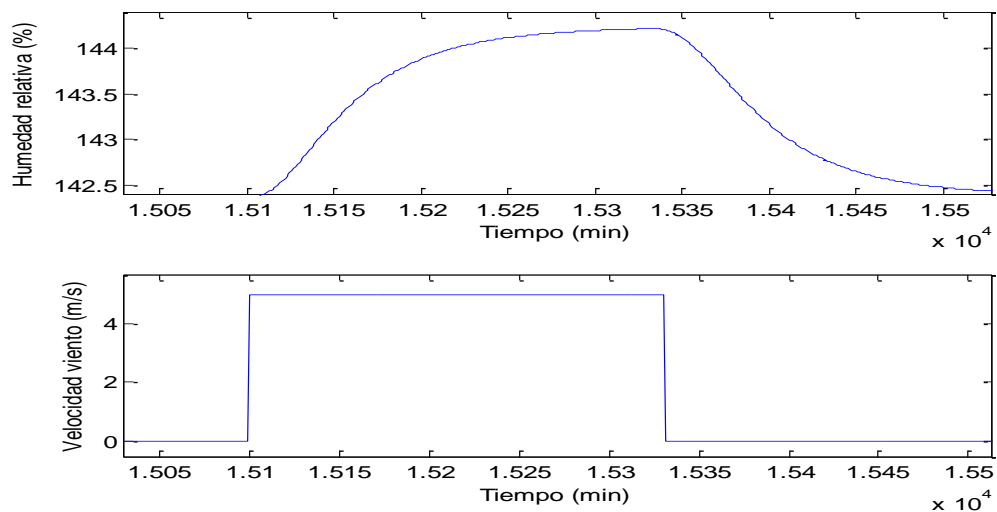


Figura 4.92 Ensayos de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 11

La tabla 4.86 expone los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados el día 11.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (%s/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	0.37953	54.901	18.492
5-0	0.37183	56.309	22.758

Tabla 4.86 Resultados de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 11

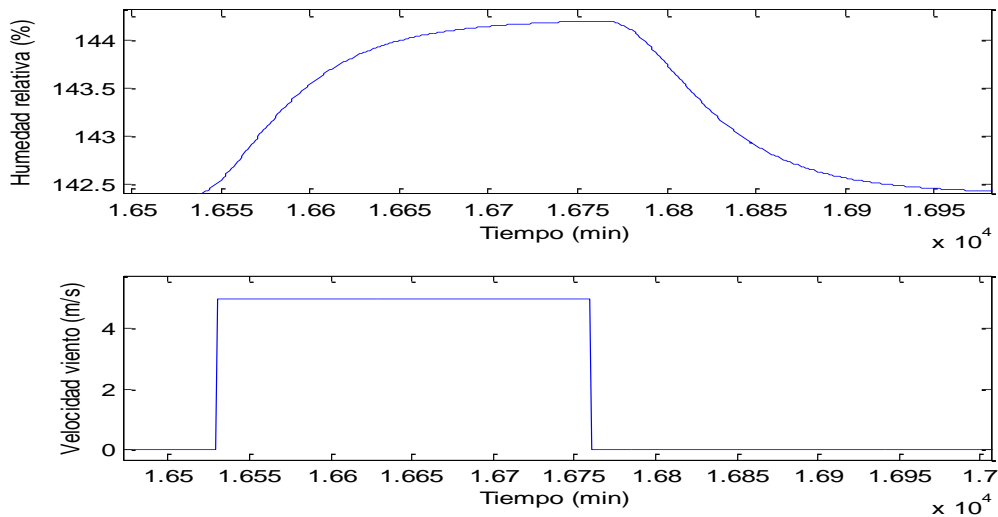


Figura 4.93 Ensayos de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 12

Los parámetros obtenidos mediante la curva de reacción, para los ensayos del día 12 se muestran en la tabla 4.87.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (%s/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	0.37845	54.418	18.56
5-0	0.36999	55.464	22.896

Tabla 4.87 Resultados de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 12

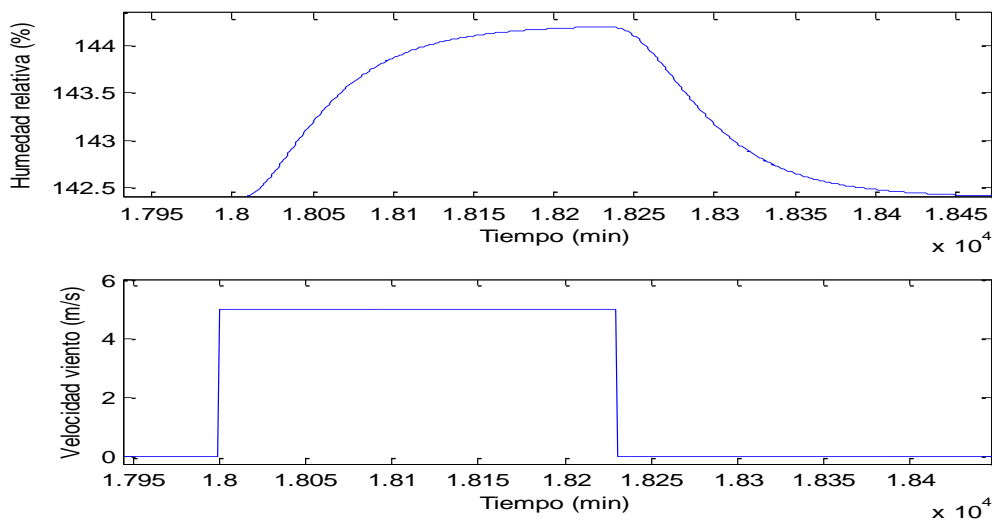


Figura 4.94 Ensayos de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 13

La tabla 4.88 expone los parámetros obtenidos en los ensayos del día 13.

Escalón (m/s)	Ganancia estática K (%s/m)	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0-5	0.3799	54.925	18.48
5-0	0.37097	55.876	22.826

Tabla 4.88 Resultados de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.89, 4.90 y 4.91):

Ganancia estática K (%s/m)		
	Escalón 1	Escalón 6
Día 8	0.3791	0.3721
Día 9	0.37846	0.370
Día 10	0.3798	0.37098
Día 11	0.37953	0.37183
Día 12	0.37845	0.36999
Día 13	0.3799	0.37097

Tabla 4.89 Resumen de ganancias estáticas de humedad relativa con entrada de velocidad del viento

Constante de tiempo (min)		
	Escalón 1	Escalón 6
Día 8	54.902	56.308
Día 9	54.42	55.462
Día 10	54.924	55.872
Día 11	54.901	56.309
Día 12	54.418	55.464
Día 13	54.925	55.876

Tabla 4.90 Resumen de constantes de tiempo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento

Tiempo de retardo (min)		
	Escalón 1	Escalón 6
Día 8	14,156	12,218
Día 9	14,156	12,218
Día 10	14,156	15
Día 11	14,825	0,127
Día 12	14,825	0,127
Día 13	14,825	1

Tabla 4.91 Resumen de tiempos de retardo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento

Las ganancias se encuentran en el rango [0.370, 0.3798] (%s/m), las constantes de tiempo en el rango [54.418, 56.309] (min) y los tiempos de retardo en el rango [0.127, 15] (min). Los rangos son bastante pequeños debido a que los ensayos realizados también han sido reducidos, por lo que cabe esperar que el modelo obtenido a partir de los parámetros medios se ajuste correctamente para entradas del tipo que se han estudiado.

$$G(s) = \frac{0.3751 e^{-20.67s}}{55.316 s+1} \quad (4.14)$$

4.1.2.2.4 Obtención del modelo de la humedad absoluta exterior.

Para obtener este modelo se han dado escalones en la humedad absoluta de 0.01 y 0.02 de amplitud, al igual que se hizo para obtener el modelo de la temperatura. La distribución de escalones se muestra en la tabla 4.92.

Día	Amplitud	Escalones					
8	0.01	0.012-0.022	0.022-0.032	0.032-0.042	0.042-0.032	0.032-0.022	0.022-0.012
9	0.01	0.012-0.022	0.022-0.032	0.032-0.042	0.042-0.032	0.032-0.022	0.022-0.012
10	0.01	0.012-0.022	0.022-0.032	0.032-0.042	0.042-0.032	0.032-0.022	0.022-0.012
11	0.02	0.012-0.032	0.032-0.052	0.052-0.072	0.072-0.052	0.052-0.032	0.032-0.012
12	0.02	0.012-0.032	0.032-0.052	0.052-0.072	0.072-0.052	0.052-0.032	0.032-0.012
13	0.02	0.012-0.032	0.032-0.052	0.052-0.072	0.072-0.052	0.052-0.032	0.032-0.012

Tabla 4.92 Distribución de los escalones para la humedad absoluta exterior

A continuación se muestran los ensayos que se han realizado para identificar el modelo de la humedad relativa del invernadero respecto a la humedad absoluta exterior (figuras de la 4.95 a la 4.100).

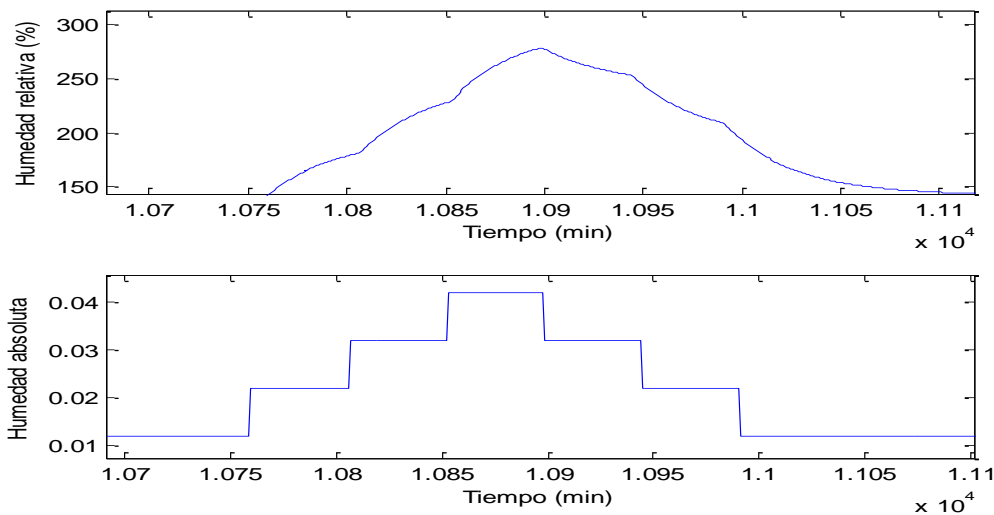


Figura 4.95 Ensayos de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 8

Se puede apreciar que la respuesta corresponde a una función de transferencia de primer orden. Los parámetros obtenidos para este día se muestran a continuación (tabla 4.93):

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.022	5228	37.535	0
0.022-0.032	4779.7	26.526	0
0.032-0.042	4980	25.266	0
0.042-0.032	3376.2	35.421	0
0.032-0.022	5334.1	33.517	0
0.022-0.012	6699.1	35.189	0

Tabla 4.93 Resultados de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 8

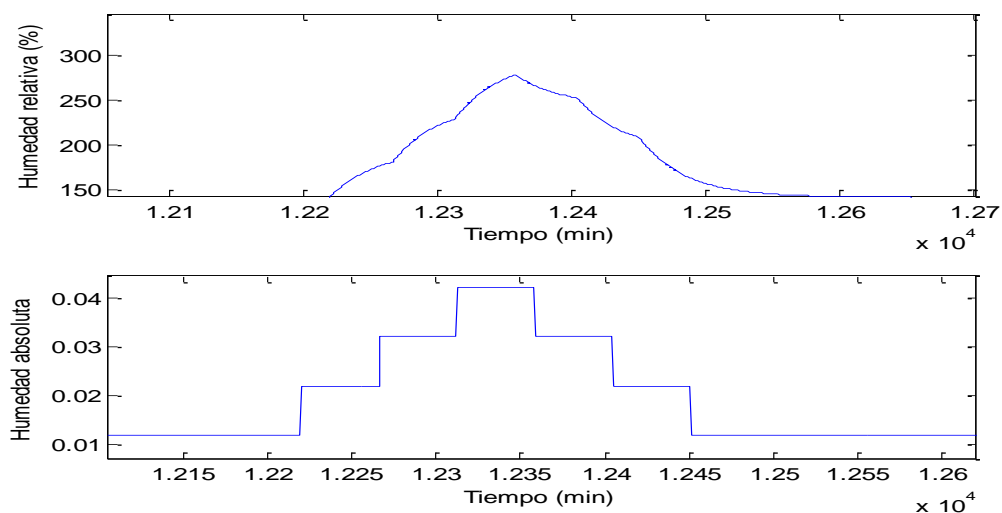


Figura 4.96 Ensayos de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 9

La tabla 4.94 muestra los resultados del día 9 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.022	5228.5	37.544	0
0.022-0.032	4780	27.805	0
0.032-0.042	4975	25.53	0
0.042-0.032	3376	35.408	0
0.032-0.022	5333.5	33.514	0
0.022-0.012	6698.9	34.198	0

Tabla 4.94 Resultados de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 9

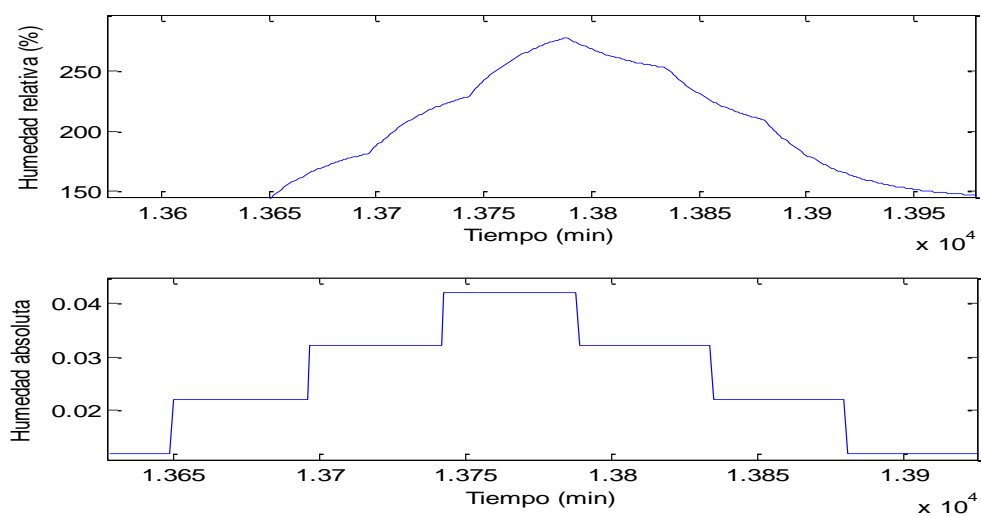


Figura 4.97 Ensayos de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 10

Los resultados obtenidos en los ensayos del día 10 se muestran en la tabla 4.95.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.022	5227.9	37.539	0
0.022-0.032	4779	28.791	0
0.032-0.042	4975	26.11	0
0.042-0.032	3390	35.716	0
0.032-0.022	5332	33.716	0
0.022-0.012	6699	34.191	0

Tabla 4.95 Resultados de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 10

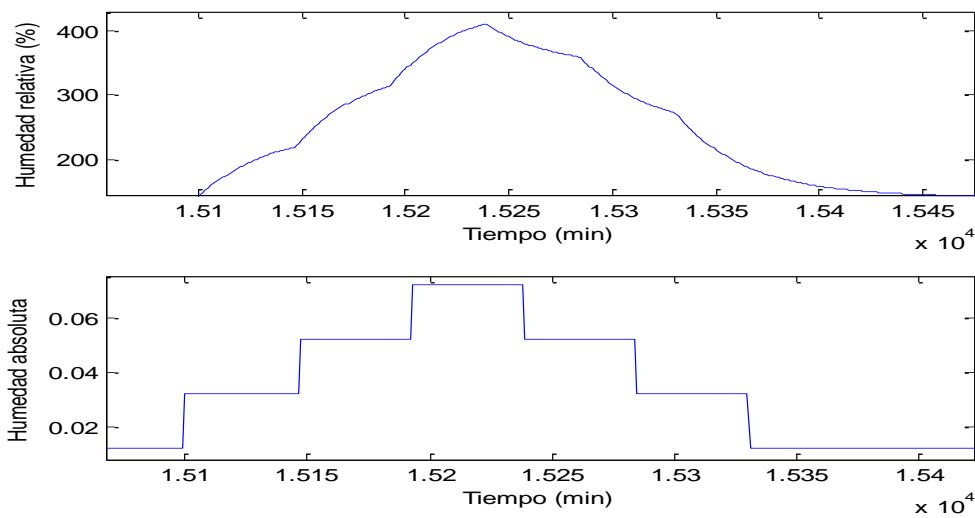


Figura 4.98 Ensayos de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 11

A continuación se presentan los parámetros obtenidos para los ensayos del día 11 (tabla 4.96).

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.032	5228	37.491	0
0.032-0.052	4779	28.801	0
0.052-0.072	4976	26.95	0
0.072-0.052	3376.5	35.44	0
0.052-0.032	5334	33.361	0
0.032-0.012	6620	34.197	0

Tabla 4.96 Resultados de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 11

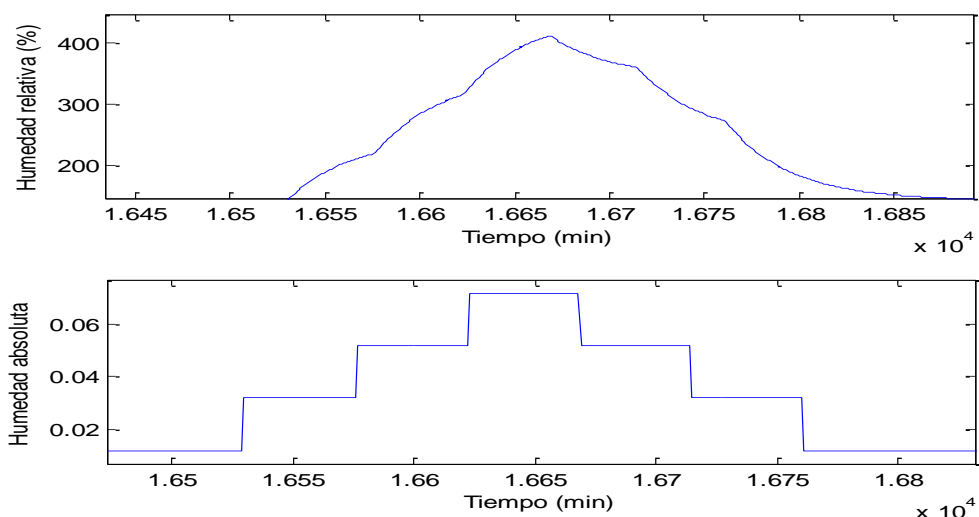


Figura 4.99 Ensayos de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 12

La tabla 4.97 muestra los resultados del día 12 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.032	5228.2	37.538	0
0.032-0.052	4890	30.02	0
0.052-0.072	5012	30.04	0
0.072-0.052	3376	37.397	0
0.052-0.032	5375	33.52	0
0.032-0.012	6627.1	34.195	0

Tabla 4.97 Resultados de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 12

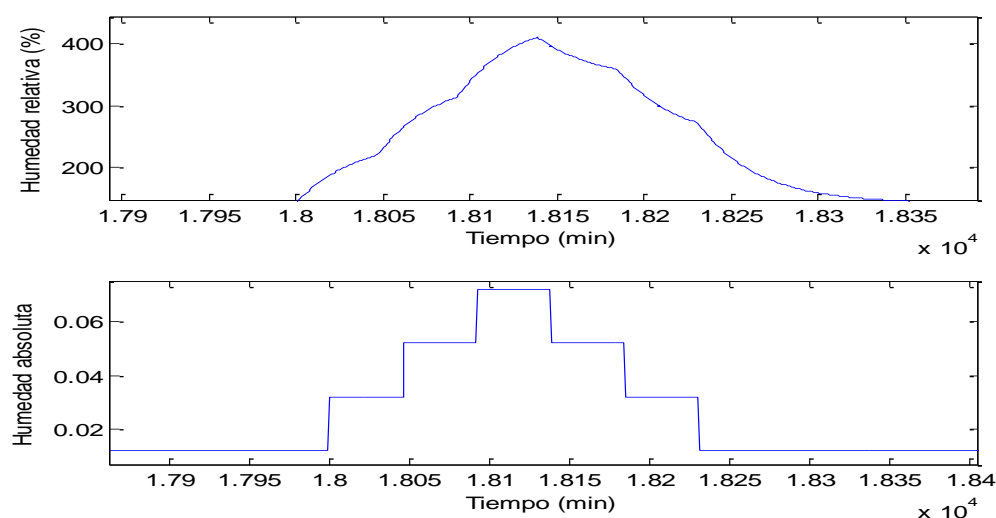


Figura 4.100 Ensayos de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 13

La tabla 4.98 expone los parámetros de los ensayos del día 13 obtenidos mediante el método de la curva de reacción.

Escalón	Ganancia estática K	Constante de tiempo τ (min)	Tiempo de retardo t_r (min)
0.012-0.032	5227.5	37.539	0
0.032-0.052	4880.6	29.2	0
0.052-0.072	4975.9	27.89	0
0.072-0.052	3375.87	35.41	0
0.052-0.032	5332.4	35.02	0
0.032-0.012	6619	37.9	0

Tabla 4.98 Resultados de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior. Día 13

Resumiendo los datos obtenidos de cada día (tablas 4.99, 4.100 y 4.101):

Ganancia estática K						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	5228	4779,7	4980	3376,2	5334,1	6699,1
Día 9	5228,5	4780	4975	3376	5333,5	6698,9
Día 10	5227,9	4779	4975	3390	5332	6699
Día 11	5228	4779	4976	3376,5	5334	6620
Día 12	5228,2	4890	5012	3376	5375	6627,1
Día 13	5227,5	4880,6	4975,9	3375,87	5332,4	6619

Tabla 4.99 Resumen de ganancias estáticas de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior

Constante de tiempo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	37,535	26,526	25,266	35,412	33,517	35,189
Día 9	37,544	27,805	25,53	35,408	33,514	34,198
Día 10	37,539	28,791	26,11	35,716	33,716	34,191
Día 11	37,491	28,801	26,95	35,44	33,361	34,197
Día 12	37,538	30,02	30,04	37,397	33,52	34,195
Día 13	37,539	29,2	27,89	35,41	35,02	37,9

Tabla 4.100 Resumen de constantes de tiempo de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior

Tiempo de retardo (min)						
	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4	Escalón 5	Escalón 6
Día 8	0	0	0	0	0	0
Día 9	0	0	0	0	0	0
Día 10	0	0	0	0	0	0
Día 11	0	0	0	0	0	0
Día 12	0	0	0	0	0	0
Día 13	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.101 Resumen de tiempos de retado de humedad relativa con entrada de humedad absoluta exterior

Las ganancias toman valores dentro del rango [3375.87, 6699.1] y las constantes de tiempo dentro del rango [25.266, 37.544] (min). Los tiempos de retardo son todos de 0 minutos. Al igual que ocurría en el ensayo de la temperatura con respecto a la humedad relativa absoluta, las ganancias son muy elevadas comparadas con el resto de los modelos obtenidos para la salida de la humedad relativa. Esto ocurre porque las variaciones de humedad absoluta son muy pequeñas y para que estas sean notables en la humedad relativa interior es necesario que la ganancia sea de este orden.

Las ganancias estáticas, igual que ocurría con los resultados de la temperatura, muestran que dentro de un mismo escalón los datos son similares, en los distintos días, y las diferencias se producen entre distintos escalones. El cuarto escalón es el que más se aleja de los demás valores. Las constantes de tiempo son también bastante diferentes entre distintos escalones. Esto nos lleva a pensar en la no linealidad del sistema, que provoca todas estas diferencias.

El modelo se ha obtenido como la media aritmética de todos los parámetros obtenidos en los diferentes ensayos:

$$G(s) = \frac{5067.4}{32.928s+1} \quad (4.15)$$

4.1.2.3 Validación de los modelos de humedad.

En este apartado se realizarán ensayos para comprobar si los modelos se ajustan correctamente. Para ello, se escogerán los días que no han sido tenidos en cuenta en la obtención de los modelos y se utilizarán dos amplitudes de entrada diferentes para comprobar su efecto, una para los cuatro primeros días y otra para los tres siguientes.

En el caso de haber más de un modelo, se escogerá el que mejor se ajuste.

4.1.2.3.1 Modelo de humedad con entrada de ventilación.

Como se comentó anteriormente, se han obtenido tres posibles modelos, al igual que en la temperatura, para el caso de la ventilación. Uno con los valores medios de todos los escalones, otro con los valores del primer y último escalón y el último se calculó con los datos de los escalones centrales.

A continuación se muestra una comparativa de los resultados obtenidos con cada uno de los modelos, ordenados por días (figuras de la 4.101 a la 4.107).

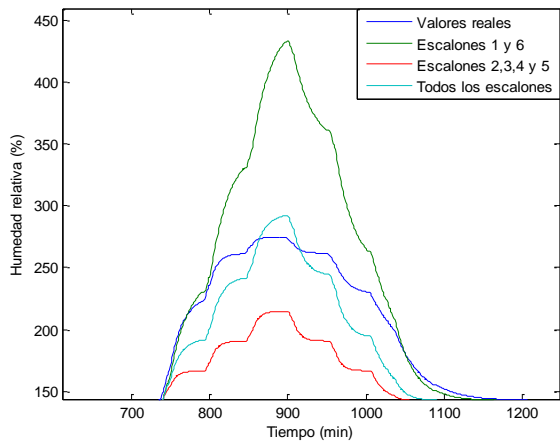


Figura 4.101 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 1

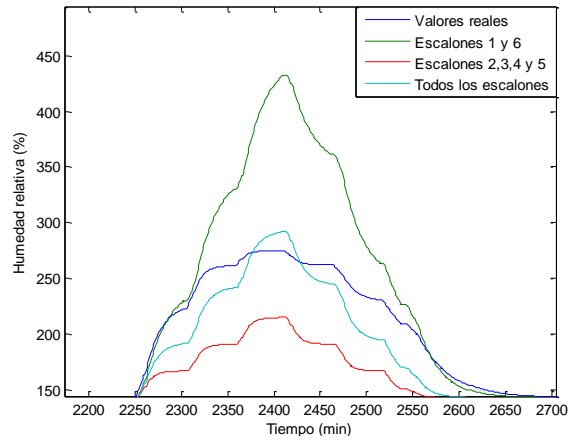


Figura 4.102 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 2

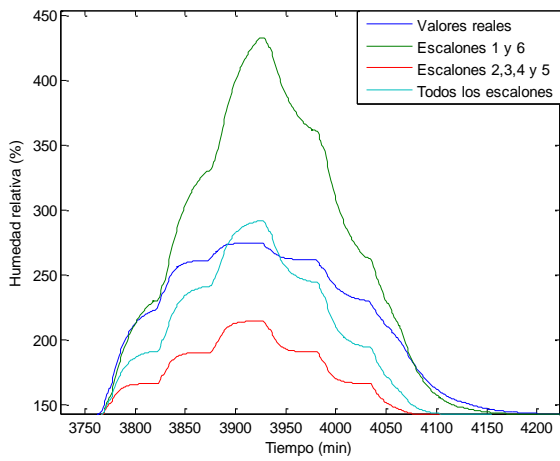


Figura 4.103 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 3

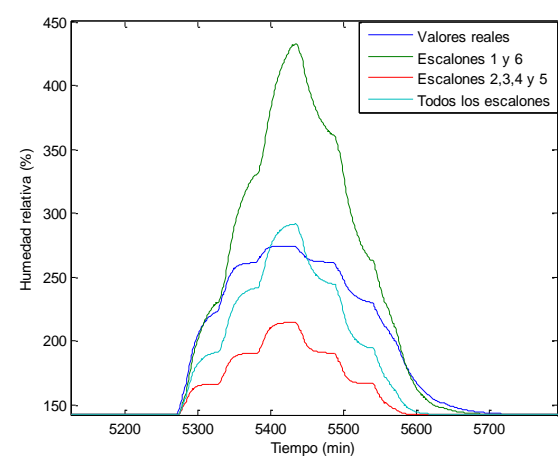


Figura 4.104 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 4

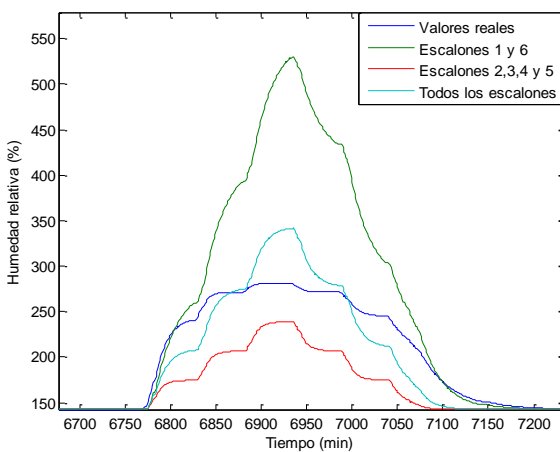


Figura 4.105 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 5

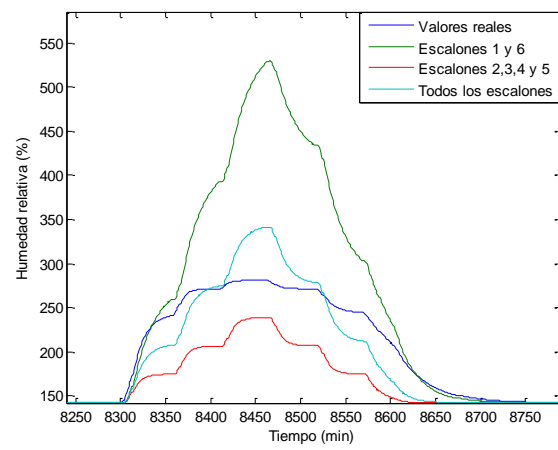


Figura 4.106 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 6

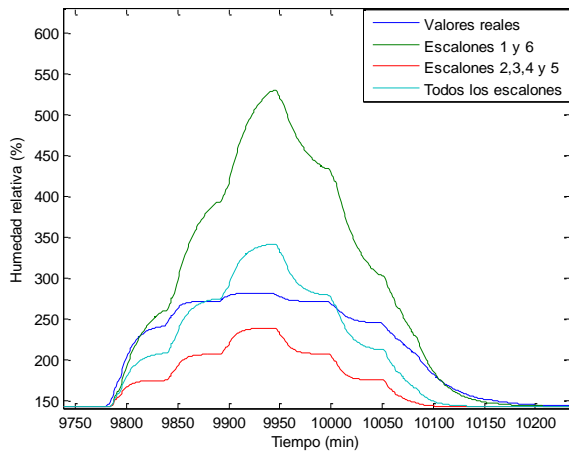


Figura 4.107 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de ventilación. Día 7

Ajuste por mínimos cuadrados		
Modelo de todos los escalones	Modelo de escalones 1 y 6	Modelo de escalones 2, 3, 4 y 5
70.07	-8.867	36.94

Tabla 4.102 Ajuste por mínimos cuadrados de la temperatura a con entrada de ventilación

Cada gráfica muestra la humedad relativa real (color azul oscuro), la humedad relativa simulada con el modelo obtenido a partir de los escalones 1 y 6 (color verde), la humedad relativa simulada con el modelo obtenido con los modelos intermedios (color rojo) y la humedad relativa simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color azul claro), para cada día.

Mirando las gráficas podríamos concluir que el modelo que más se aproxima a la respuesta real de la humedad relativa es el obtenido como la media de los parámetros de todos los escalones. Pero, para comprobar que es realmente así se ha realizado un ajuste por mínimos cuadrados de todos los modelos, que se muestra en la tabla 4.102.

Con un ajuste del 70.07%, el modelo que mejor se ajusta a la respuesta real es el obtenido a partir de la media de todos los escalones:

$$G(s) = \frac{3.3546 e^{-s}}{13.216s+1} \quad (4.16)$$

4.1.2.3.2 Modelo de humedad con entrada de radiación solar.

A continuación se muestra los resultados del ajuste del modelo obtenido para la radiación solar, ordenado por días (figuras de la 4.108 a la 4.114).

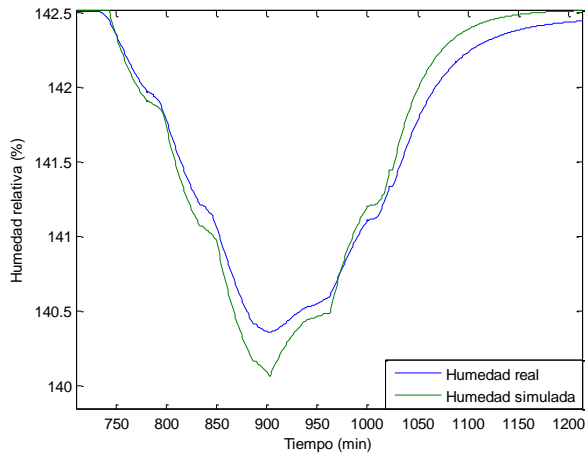


Figura 4.108 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 1

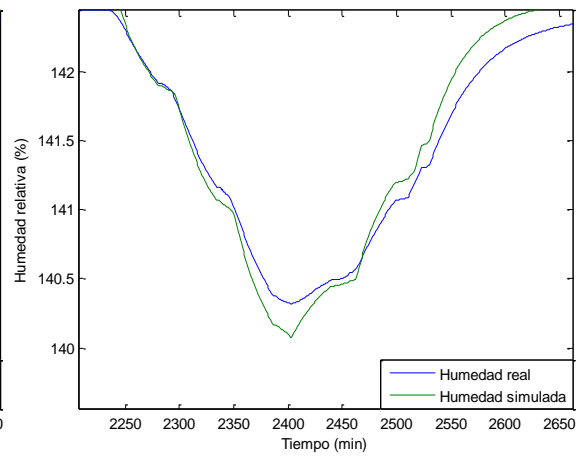


Figura 4.109 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 2

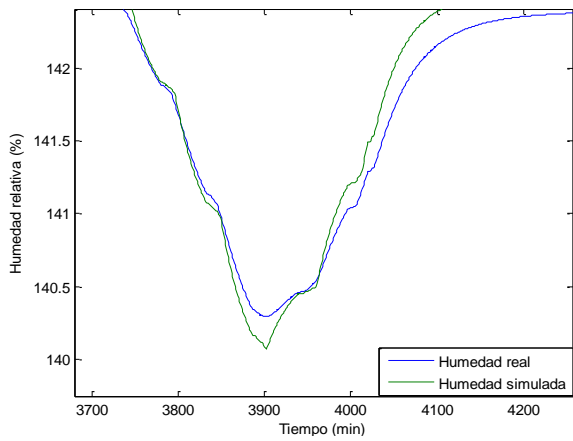


Figura 4.110 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 3

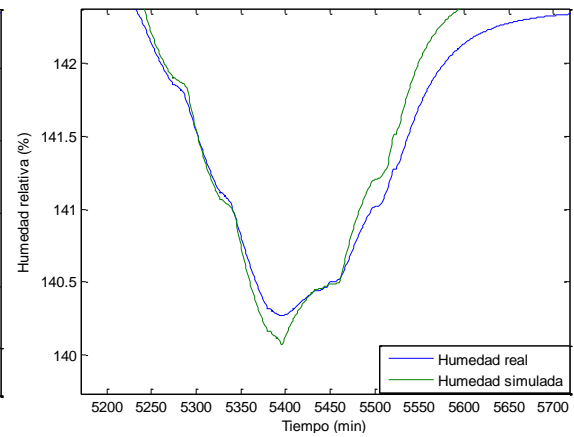


Figura 4.111 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 4

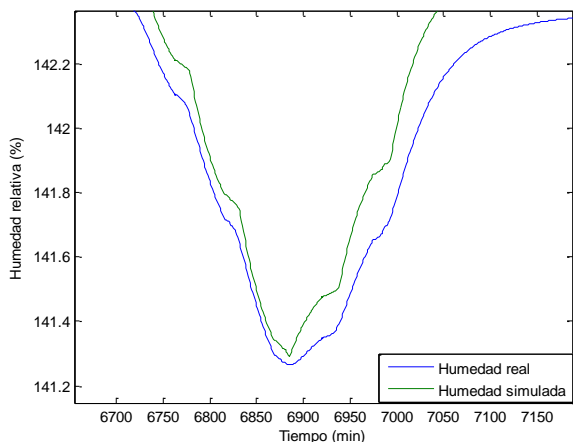


Figura 4.112 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 5

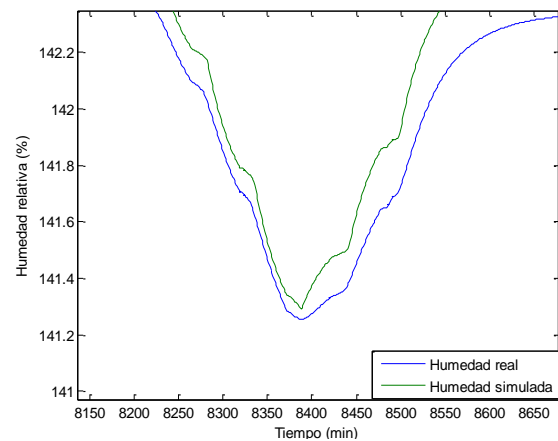


Figura 4.113 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 6

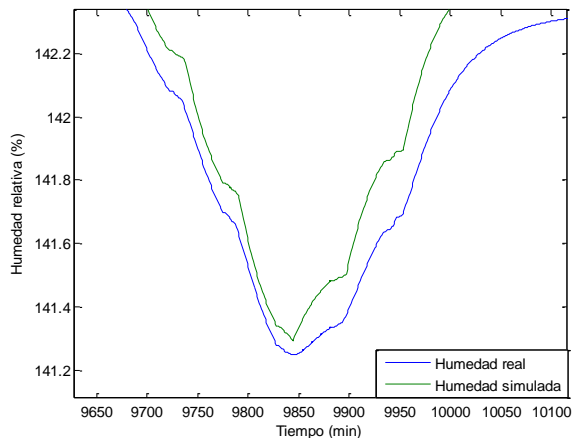


Figura 4.114 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de radiación solar. Día 7

Cada gráfica muestra para un día distinto la humedad relativa real (color azul) y la humedad relativa simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color verde).

Se puede apreciar que la diferencia entre amplitudes de la entrada provoca cambios en la salida del sistema. En los cuatro primeros días, que tienen la misma amplitud de radiación solar, el modelo no supera la ganancia total de la humedad real. Sin embargo, en los tres días siguientes, la amplitud de la entrada cambia respecto a los primeros días y ahora el modelo no es capaz de llegar a la ganancia real del sistema.

A pesar de esto, el modelo se ajusta correctamente a la dinámica del sistema con un ajuste por mínimos cuadrados es del 97.55%.

4.1.2.3.3 Modelo de humedad con entrada de temperatura exterior.

A continuación se muestra los resultados del ajuste del modelo obtenido para la temperatura exterior, ordenado por días (figuras de la 4.115 a la 4.121).

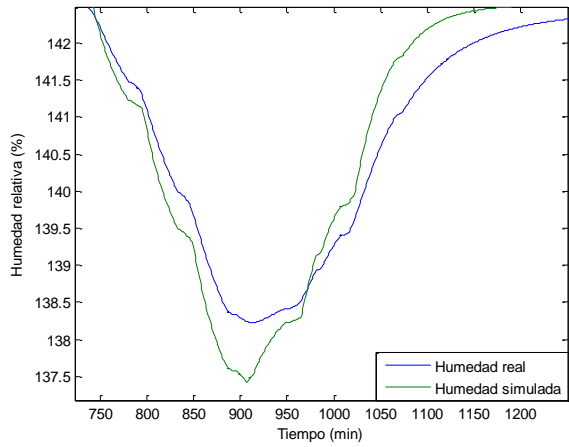


Figura 4.115 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 1

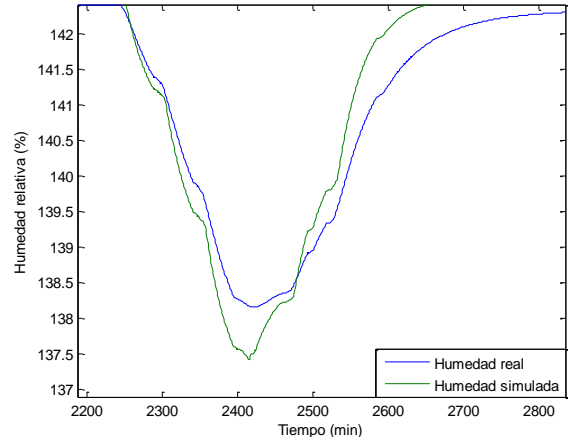


Figura 4.116 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 2

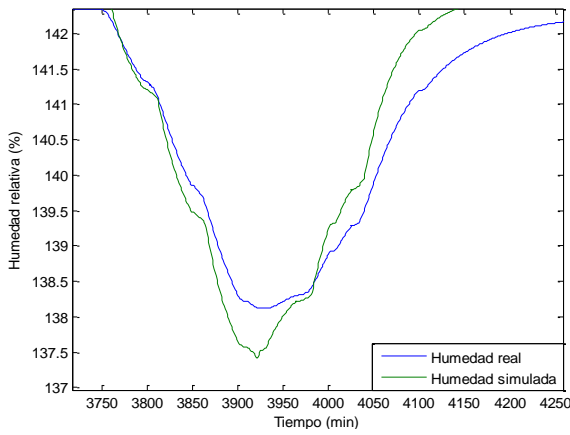


Figura 4.117 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 3

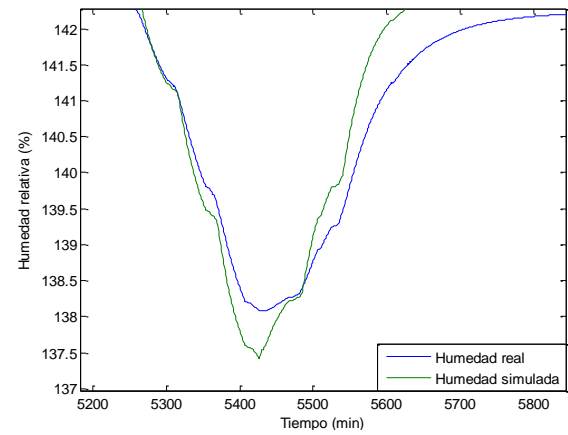


Figura 4.118 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 4

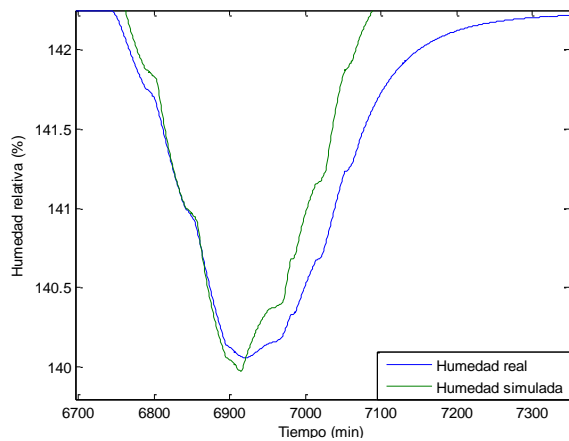


Figura 4.119 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 5

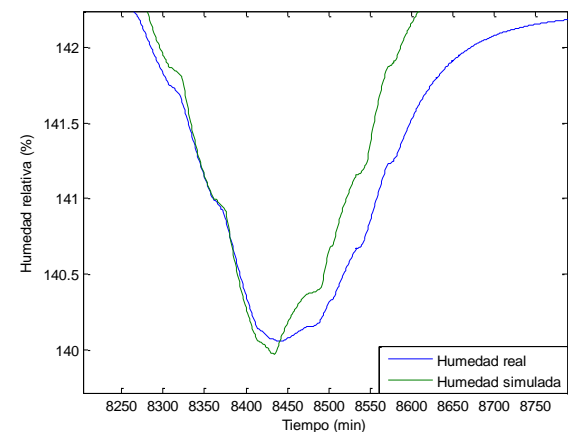


Figura 4.120 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 6

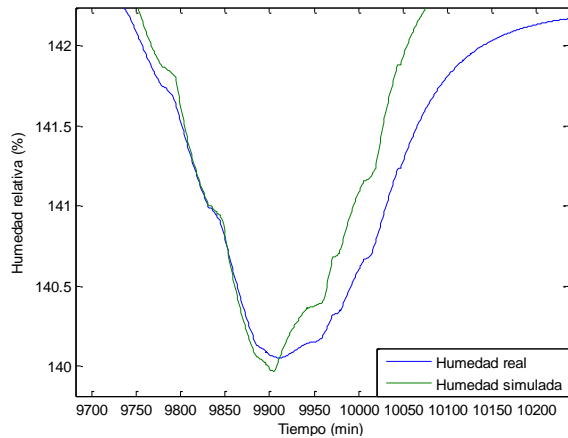


Figura 4.121 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de temperatura exterior. Día 7

Las gráficas representan la humedad relativa real (color azul) y la humedad relativa simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color verde), para cada día (días del 1 al 7).

Se puede ver que el modelo se ajusta bastante bien en los dos primeros escalones, incluso el tercero, teniendo en cuenta que los tres últimos días presentan mejores resultados que los cuatro primeros. Pero a partir de ahí, se puede ver la diferencia entre escalones, especialmente en las ganancias. La ganancia del cuarto escalón es claramente diferente a la de los demás, lo que provoca el desajuste de todos los demás escalones que siguen a este. Esto se debe a la no linealidad del modelo.

Sin embargo, el modelo capta bien la dinámica principal. El ajuste por mínimos cuadrados es del 67.5%.

4.1.2.3.4 Modelo de humedad con entrada de velocidad del viento.

A continuación se muestra los resultados del ajuste del modelo obtenido para la velocidad del viento, ordenado por días (figuras de la 4.122 a la 4.128).

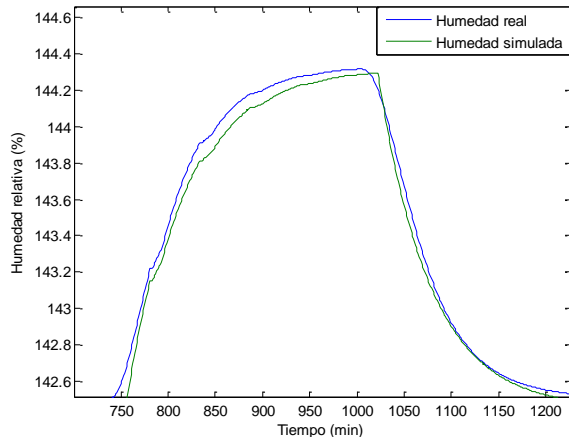


Figura 4.122 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 1

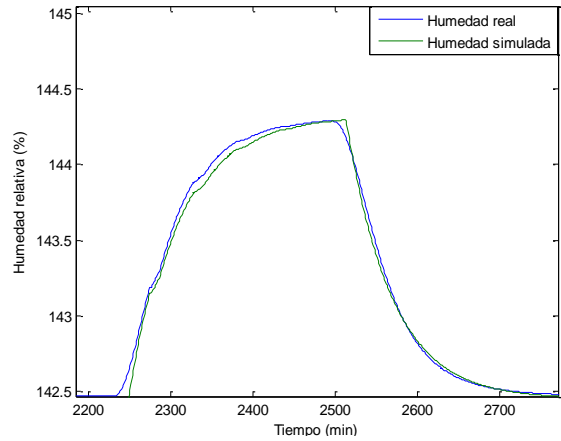


Figura 4.123 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 2

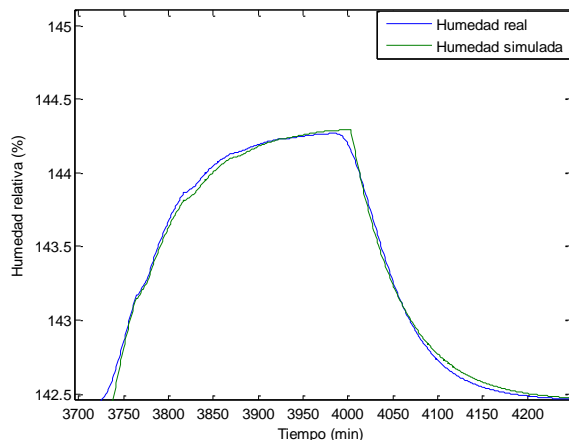


Figura 4.124 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 3

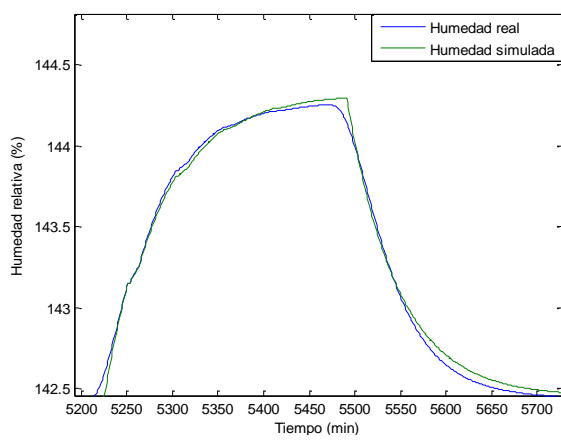


Figura 4.125 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 4

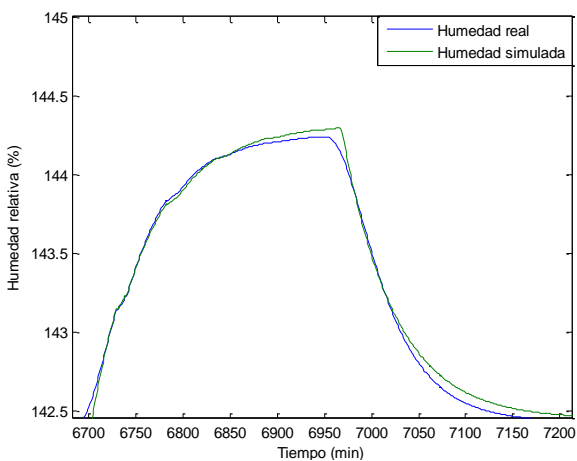


Figura 4.126 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 5

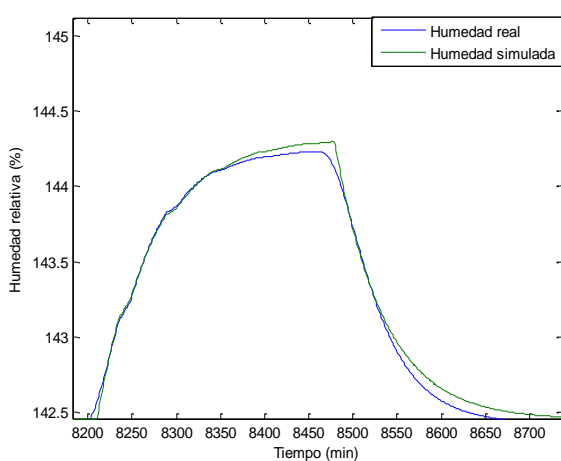


Figura 4.127 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 6

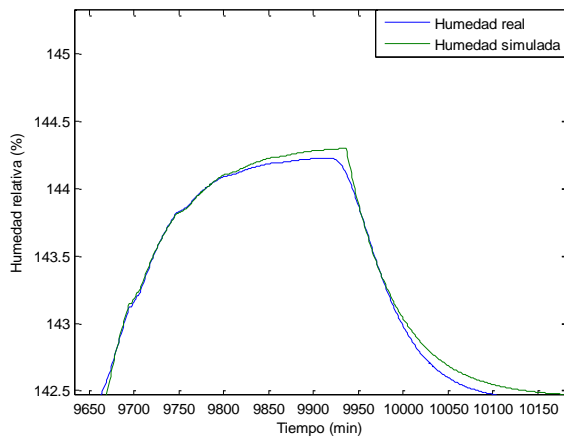


Figura 4.128 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de velocidad del viento. Día 7

Las gráficas representan la humedad relativa real (color azul) y la humedad relativa simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones (color verde), para cada día (días del 1 al 7).

Todos los ensayos han sido realizados con la misma amplitud y solo se han dado dos escalones, debido a la saturación del sistema, por lo que los resultados son casi perfectos. El ajuste del modelo es del 97.9%.

4.1.2.3.5 Modelo de humedad con entrada de humedad absoluta exterior.

A continuación se muestra los resultados del ajuste del modelo obtenido para la humedad absoluta exterior, ordenado por días (figuras de la 4.129 a la 4.135).

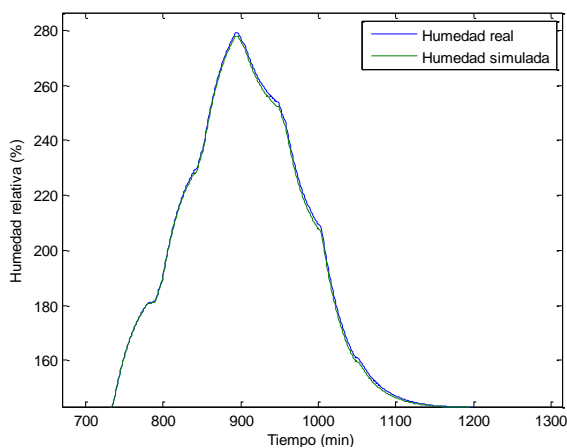


Figura 4.129 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de humedad exterior. Día 1

Figura 4.123. Día 1

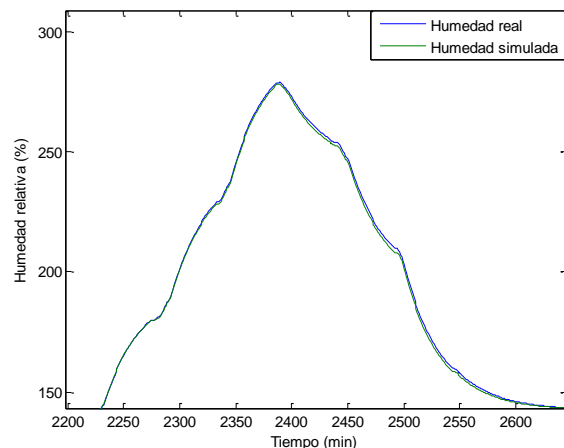


Figura 4.130 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de humedad exterior. Día 2

Figura 4.124. Día 2

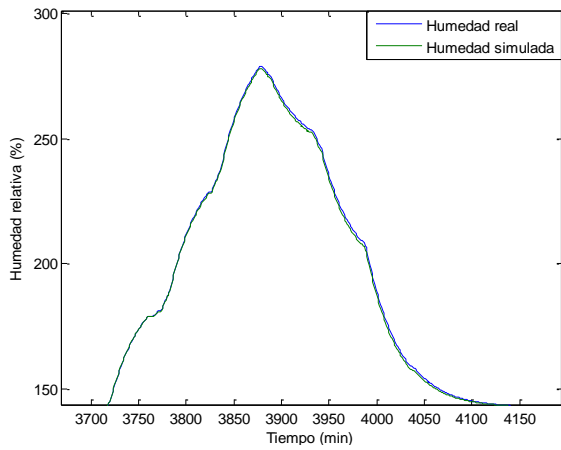


Figura 4.131 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de humedad exterior. Día 3

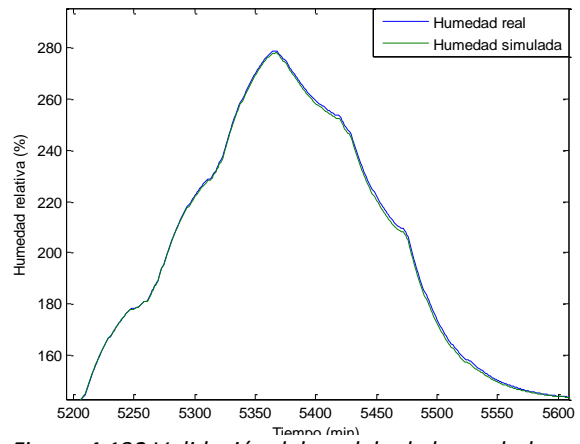


Figura 4.132 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de humedad exterior. Día 4

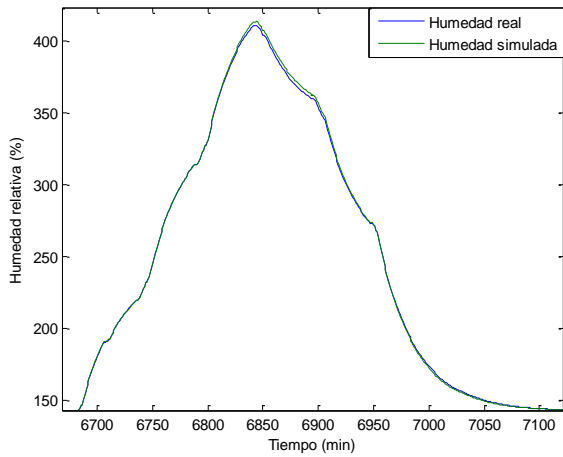


Figura 4.133 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de humedad exterior. Día 5

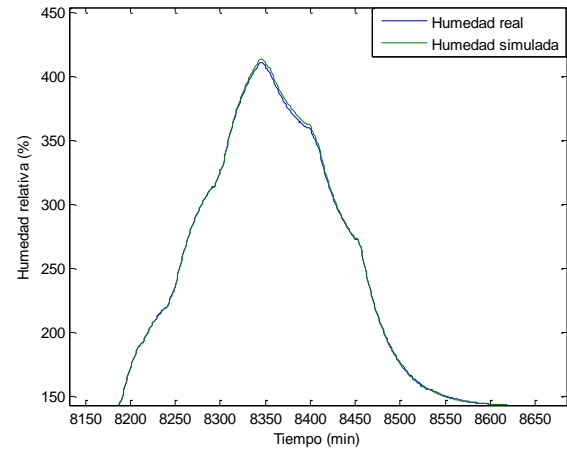


Figura 4.134 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de humedad exterior. Día 6

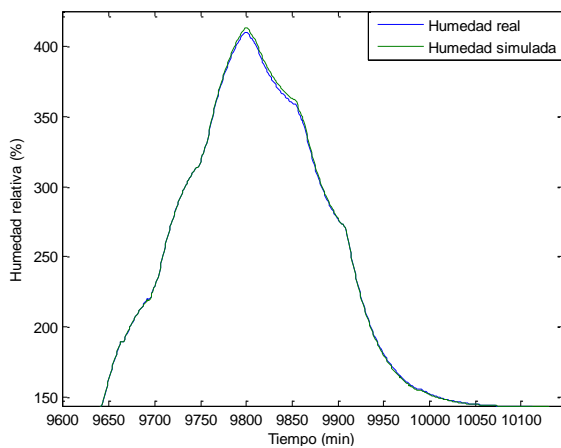


Figura 4.135 Validación del modelo de humedad relativa con entrada de humedad exterior. Día 7

Al igual que en las gráficas de los ensayos anteriores, la humedad relativa real está representada en color azul y la humedad relativa simulada con el modelo obtenido a partir de la media de todos los escalones se muestra en color verde.

Se puede observar que es uno de los mejores modelos obtenidos. A pesar de las variaciones de amplitud de la entrada y del punto de operación, se ajusta perfectamente a cada escalón, durante todos los días. El ajuste por mínimos cuadrados es del 98.66%.

4.1.2.3.6 Validación del modelo de humedad relativa completo.

Por último, se han desarrollado diversos ensayos con el modelo completo para comprobar si se ajusta a la dinámica principal del sistema. Estos ensayos se han realizado con datos reales de las perturbaciones en el invernadero. En la figura 4.136 se muestran los resultados obtenidos:

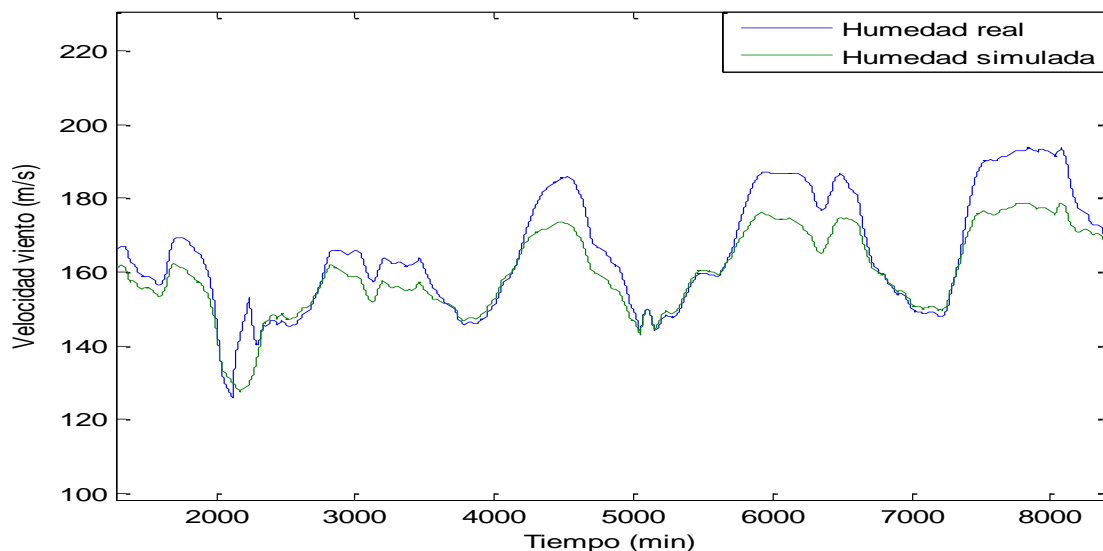


Figura 4.136 Modelo final de humedad relativa

Se pueden apreciar algunos picos a los que el modelo no llega correctamente. Esto ocurre en las subidas de la velocidad del viento, ya que el sistema es tan no lineal respecto a esta perturbación que la amplitud del cambio que se produce hace variar demasiado la ganancia estática del sistema. Si se aumentase la ganancia para ajustar estos picos en la velocidad del viento, la más leve variación en el viento aumentaría demasiado la humedad relativa. A pesar de esto, los resultados son bastante buenos (error relativo de 0.074).

4.2 Batería de ensayos de estrategias de control.

En este apartado se describen los distintos ensayos realizados de los controladores propuestos y se explicará cómo se han sintonizado y los esquemas implementados en la herramienta Simulink.

Primero se han controlado la temperatura y la humedad por separado. Sin embargo, al tener dos salidas y una sola entrada al proceso, lo óptimo sería una estrategia de control que permitiese actuar sobre la temperatura y la humedad al mismo tiempo. Para ello, se ha propuesto un control selectivo que dé prioridad al control de la temperatura, variable principal del sistema, y que cuando ésta este entorno a un rango β previamente establecido, se pasará al control de la humedad.

4.2.1 Control de la temperatura.

El control que se llevará a cabo será un control PI, dejando de lado la parte derivativa, ya que incluir esta parte amplificaría el ruido y al ser todos los modelos de primer orden no será necesaria.

El método que se utilizará para la sintonización de los PI será el método lambda, idóneo para sistemas de primer orden con retardo. Este método sigue dos reglas de sintonización:

$$K = \frac{\tau}{k_p(L+\lambda)} \quad (4.17)$$

$$\tau_I = \tau \quad (4.18)$$

De esta manera, la constante de tiempo en bucle cerrado (τ_I) es igual a τ en bucle abierto y K depende de la ganancia estática del sistema (k_p), del tiempo de retardo (L), de la constante de tiempo (τ) y del parámetro lambda (λ). Este último a su vez se escogerá dependiendo del tipo de control se desee. Si se desea un control agresivo, lo ideal sería escoger $\lambda = T$, mientras que si el objetivo es un control más robusto, entonces $\lambda = 3T$.

Por tanto, los parámetros que se utilizarán para el controlador son:

$$k_p = -115.97 \text{ }^\circ\text{C}/\% \quad (4.19)$$

$$\tau_I = 2.957 \text{ min} \quad (4.20)$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos para una consigna de 42 °C.

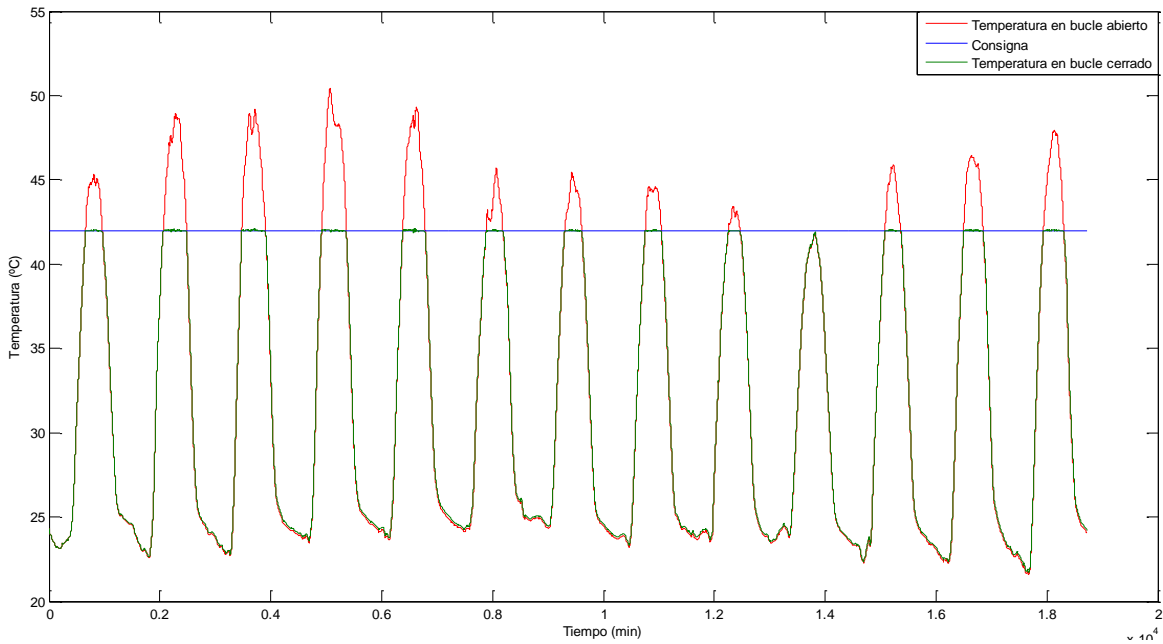


Figura 4.139 Control de temperatura

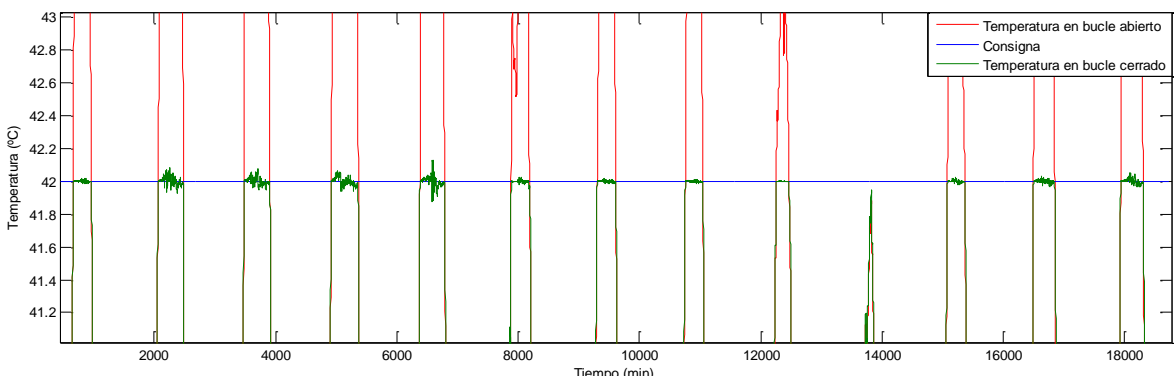


Figura 4.140 Control de temperatura ampliado

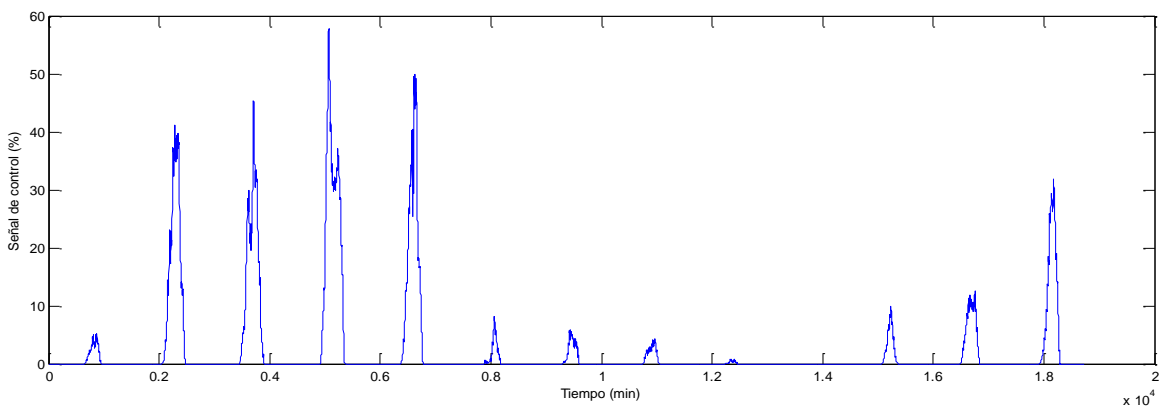


Figura 4.141 Señal de control

La primera gráfica (figuras 4.139) muestra la temperatura en bucle abierto (color rojo), la temperatura en bucle cerrado (color verde) y la consigna establecida en 42 °C (color azul). La figura 4.140 es una versión ampliada de la gráfica anterior, que permite observar con más detalle el control. La última gráfica (figura 4.141) representa la señal de control.

Se puede ver como la ventilación actúa cuando la temperatura es superior a la deseada (42 °C). En el primer día la temperatura aumenta muy poco por encima de los cuarenta y dos grados, por lo que la señal de control actúa sobre ella, pero en menor medida que en los días siguientes, que sobre pasan la consigna por bastante más. En el día 10 la temperatura no supera la consigna, por lo que el controlador no actúa. Los resultados son bastantes buenos, sin embargo, aún son mejorables. Hay muchos picos debido a las perturbaciones que afectan al sistema, por lo que en el siguiente apartado se añadirá otra estrategia de control para eliminar en la medida de lo posible el efecto de las perturbaciones.

4.2.1.1 Control anticipativo de las perturbaciones del sistema.

Para mejorar el control PI se ha añadido un control por adelanto. Los controladores con realimentación no tienen en cuenta la influencia de las perturbaciones que se producen y afectan al sistema, como se comentó en el capítulo 3. Debe existir un error para que se inicie la acción correctiva.

Un medio para corregir el efecto de las perturbaciones es el control feedforward, el cual compensa el efecto de las mismas antes que produzcan error en la variable controlada [1]. El cálculo se realiza a partir de la ecuación 4.17.

$$G_{ff} = -\frac{G_p}{G_s} \quad (4.17)$$

Donde G_p es la función de transferencia de la perturbación y G_s la función de transferencia del proceso.

Por tanto, las funciones de transferencia de los feedforward serán las siguientes:

- Feedforward para la radiación solar.

$$\frac{0.01909}{0.0477} \frac{2.957s+1}{12.041s+1} \quad (4.18)$$

- Feedforward para la temperatura exterior.

$$\frac{0.4166}{0.0477} \frac{2.957s+1}{19.652s+1} \quad (4.19)$$

- Feedforward para la velocidad del viento.

$$-\frac{0.3751}{0.0477} \frac{2.957s+1}{55.316s+1} \quad (4.20)$$

- Feedforward para la humedad exterior.

$$\frac{111.889}{0.0477} \frac{2.957s+1}{34.917s+1} \quad (4.21)$$

El esquema realizado en Simulink se muestra a continuación (figura 4.142):

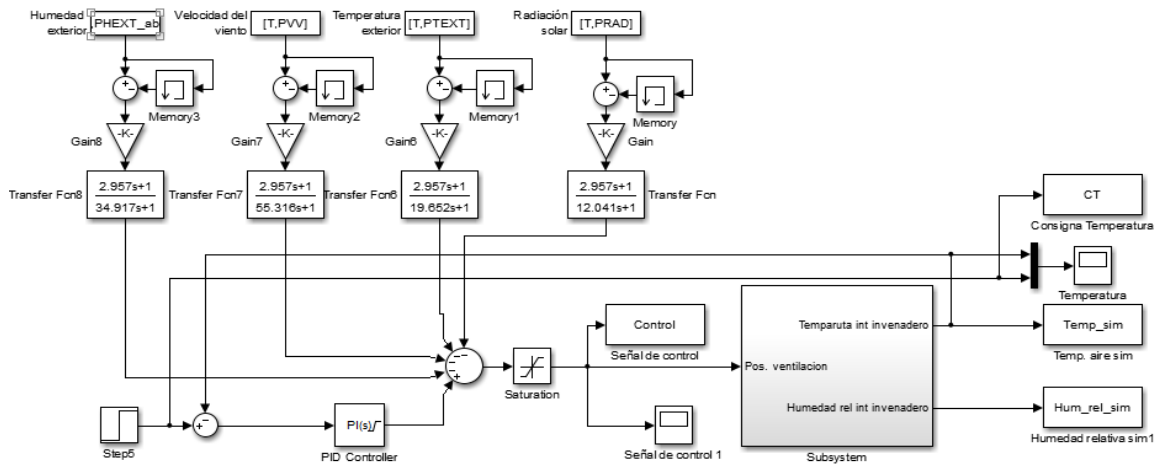


Figura 4.142 Esquema de temperatura con feedforward

Hay que destacar que al resultado total de la señal de control y de los feedforward es necesario añadirle un bloque de saturación para que no supere el 100% ni esté por debajo del 0%.

Los resultados de este control se muestran en las siguientes figuras.

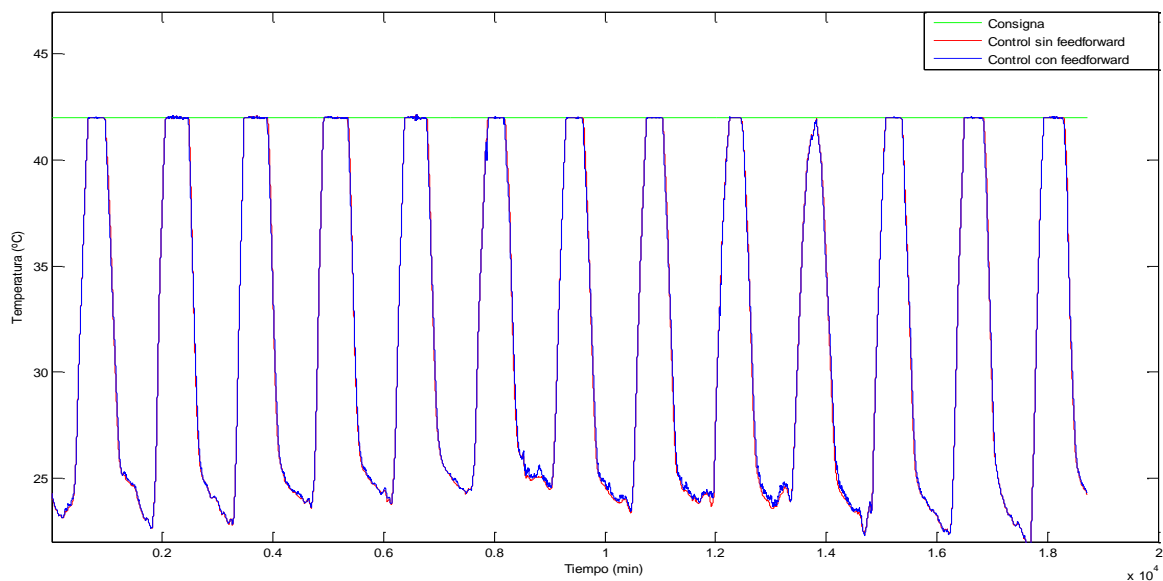


Figura 4.143 Control de temperatura con feedforward

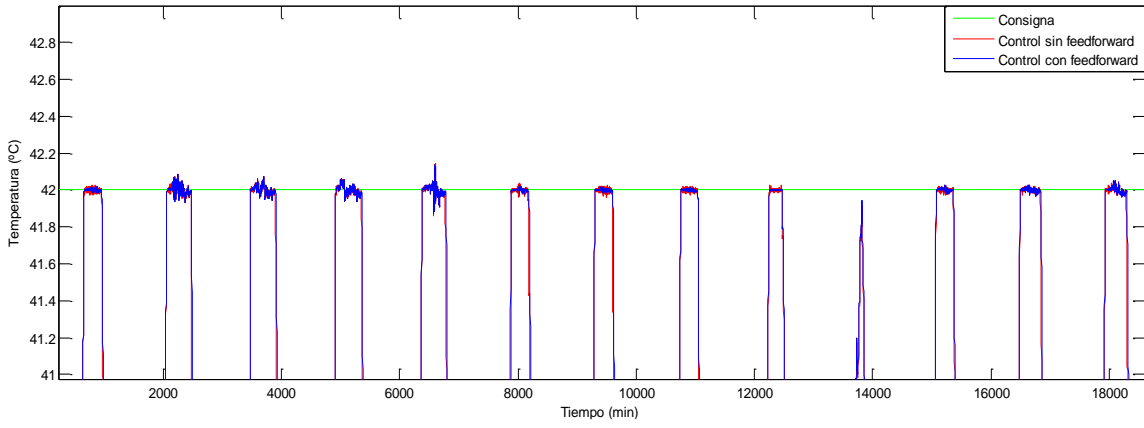


Figura 4.144 Control de temperatura ampliado

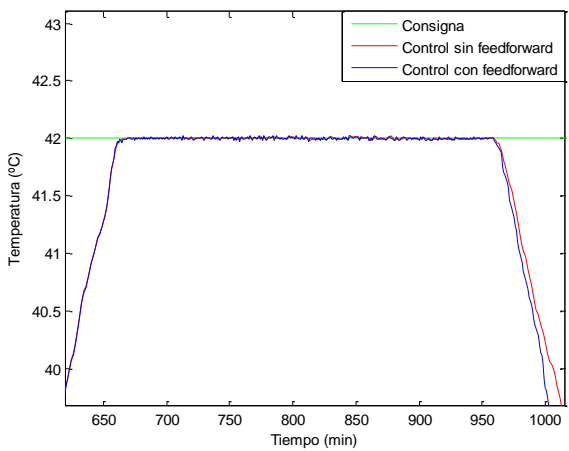


Figura 4.145 Control de temperatura en el día 3

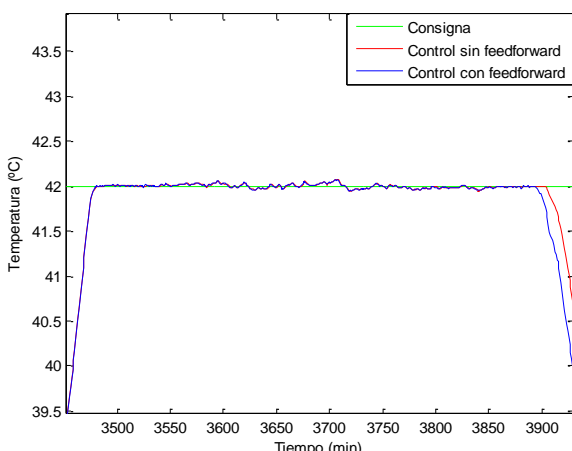


Figura 4.146 Control de temperatura en el día 1

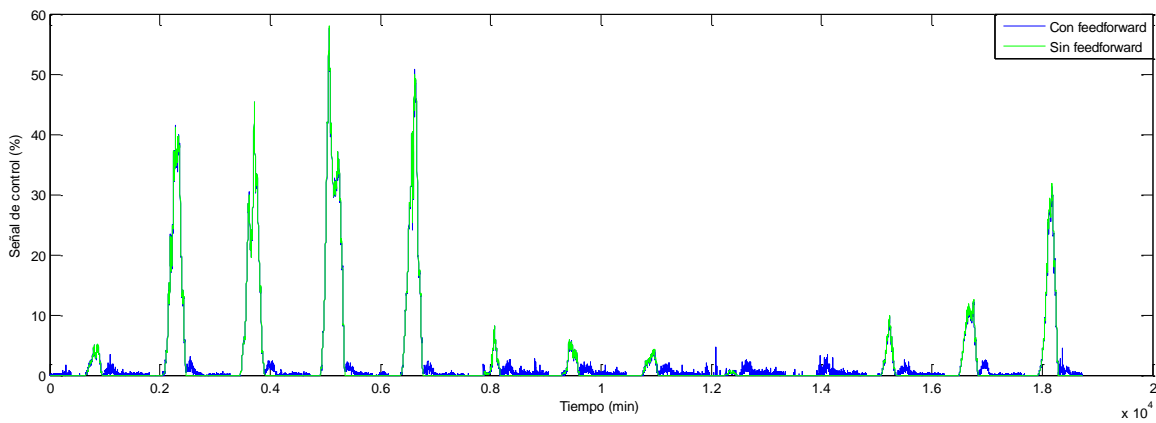


Figura 4.147 Señal de control con feedforward

La primera gráfica (figura 4.143) muestra la temperatura con un controlador PI (color rojo), la temperatura con un controlador PI y control anticipativo (color azul) y la consigna establecida en 42 °C (color verde). Las siguientes gráficas (4.144, 4.145 y 4.146), a excepción de la última, son ampliaciones de la primera, para obtener una mejor visión del control. Añadir el control anticipativo mejora un 0.08% la respuesta respecto a la consigna.

La figura 4.147 representa la señal de control. Aquí podemos ver como a la señal del controlador PI se le suma el efecto de las perturbaciones, de manera que cuando llega una perturbación, el controlador tiene información sobre esta y actúa en consecuencia.

4.2.2 Control de la humedad relativa.

Al igual que para la temperatura, el control que se utilizará para la humedad relativa será un control PI basado en el método lambda, idóneo para sistemas de primer orden con retardo. Este método sigue dos reglas de sintonización, como se explicó anteriormente:

$$K = \frac{\tau}{k_p(L+\lambda)} \quad (4.22)$$

$$\tau_I = \tau \quad (4.23)$$

De esta manera, la constante de tiempo en bucle cerrado (τ_I) es igual a τ en bucle abierto y K depende de la ganancia estática del sistema (k_p), del tiempo de retardo (L), de la constante de tiempo (τ) y del parámetro lambda (λ). Este último a su vez se escogerá dependiendo del tipo de control se desee. Si se desea un control agresivo, lo ideal sería escoger $\lambda = T$, mientras que si el objetivo es un control más robusto, entonces $\lambda = 3T$.

Por tanto, los parámetros que se utilizarán para el controlador son:

$$k_p = 2.189 \quad (4.24)$$

$$\tau_I = 13.216 \text{ min} \quad (4.20)$$

El esquema implementado en Simulink se muestra a continuación (figura 4.148):

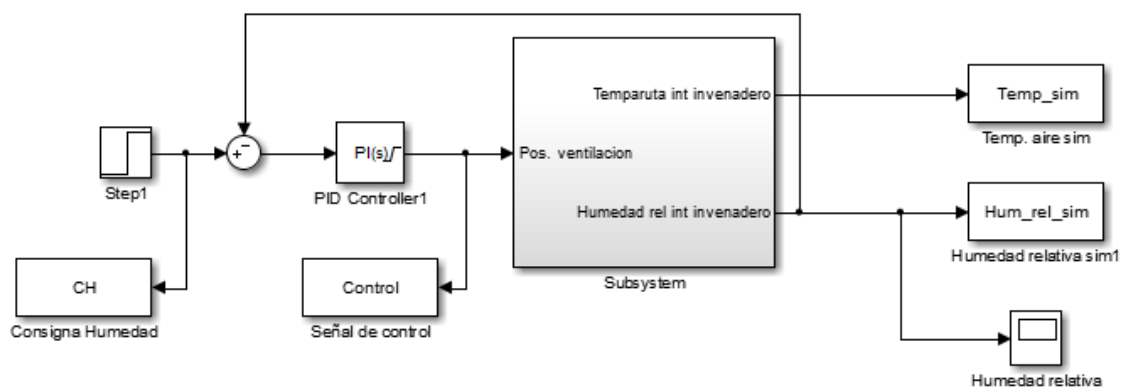


Figura 4.148 ESquema de control de humedad relativa

Al bloque PI se le han añadido los límites de saturación de la ventilación (0-100%) y un sistema anti-windup, comentado anteriormente en el control de la temperatura.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para una consigna de 27%.

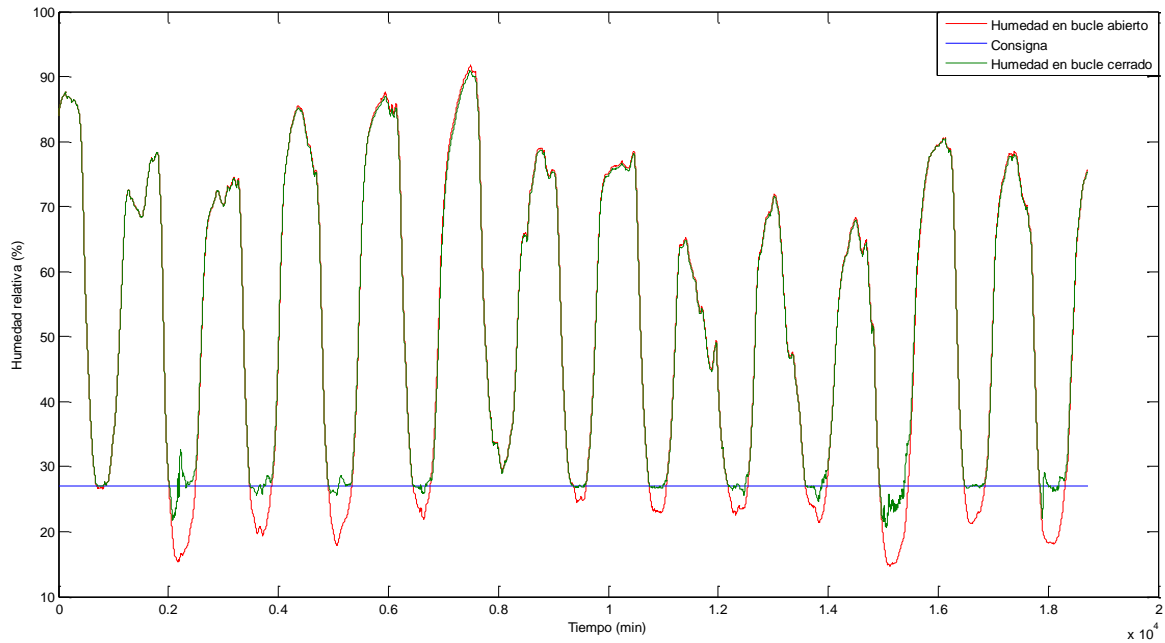


Figura 4.149 Control de humedad

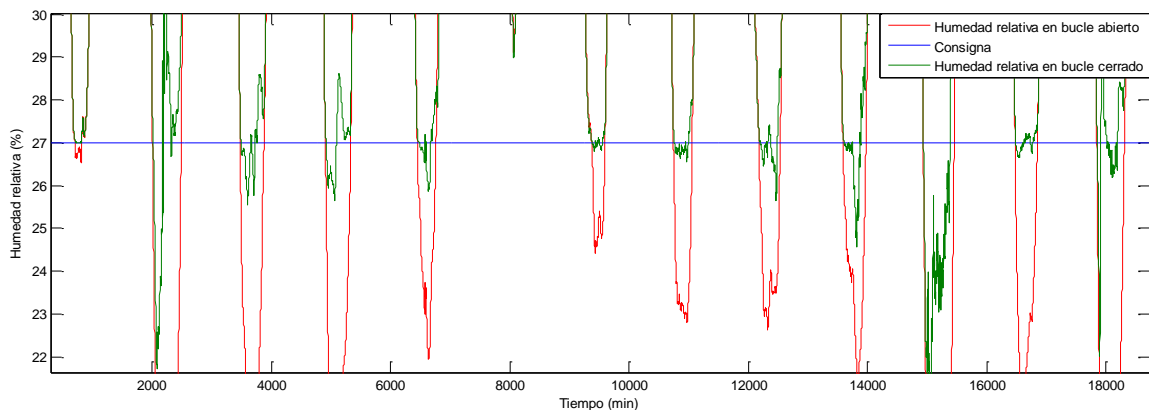


Figura 4.150 Control de humedad ampliado

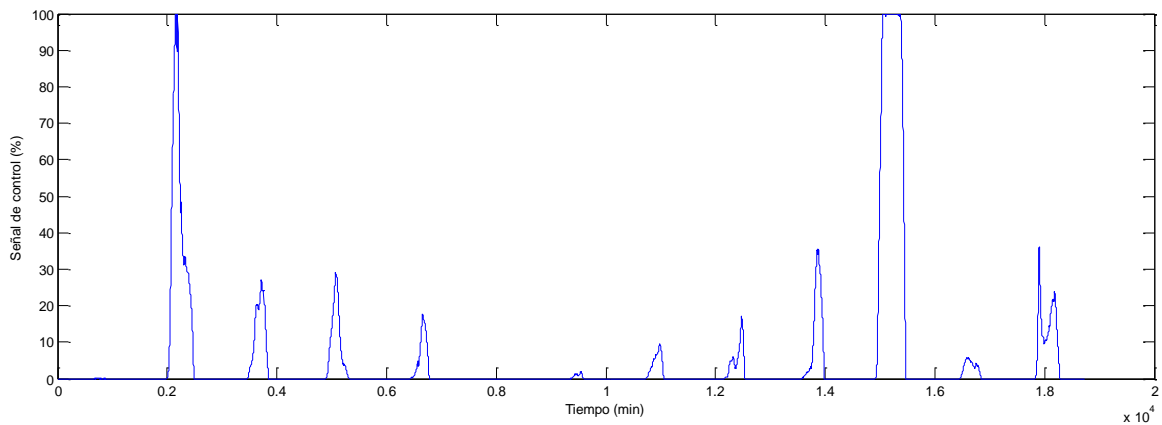


Figura 4.151 Señal de control

La primera gráfica (figura 4.149) muestra la humedad relativa en bucle abierto (color rojo), la humedad relativa en bucle cerrado (color verde) y la consigna establecida en 27% (color azul). La figura 4.150 es una ampliación de la primera gráfica para poder observar mejor la zona donde actúa el control. La tercera gráfica (figura 4.151) representa la señal de control.

Se puede ver como la ventilación actúa cuando la humedad es inferior a la deseada (27 %). En el primer día la humedad es aproximadamente igual a la consigna, por lo que el controlador apenas actúa. En los días siguientes, la humedad sí es bastante inferior al 27%, por lo que la acción del controlador es mayor. En los días 2 y 11, la humedad es tan inferior a la deseada, que a pesar de que la ventilación está abierta al 100%, no se consigue llegar a la consigna establecida. El caso contrario se puede apreciar en el día 6, que la humedad es tan elevada que no se puede actuar sobre ella.

4.2.2.1 Control anticipativo de las perturbaciones del sistema.

Como se comentó anteriormente, los controladores con realimentación no tienen en cuenta el efecto de posibles perturbaciones que afectan al sistema. Es por esto que al controlador PI se le ha añadido un control por adelanto, encargado de compensar el efecto de las mismas.

Al igual que en el cálculo de los feedforward para la temperatura, la ecuación utilizada será la siguiente:

$$G_{ff} = -\frac{G_p}{G_s} \quad (4.21)$$

Donde G_p es la función de transferencia de la perturbación y G_s la función de transferencia del proceso.

Por tanto, las funciones de transferencia de los feedforward serán las siguientes:

- Feedforward para la radiación solar.

$$\frac{0.0093}{3.355} \frac{13.216s+1}{35.35s+1} \quad (4.22)$$

- Feedforward para la temperatura exterior.

$$\frac{0.1936}{3.355} \frac{13.216s+1}{35.25s+1} \quad (4.23)$$

- Feedforward para la velocidad del viento.

$$-\frac{5067.36}{3.355} \frac{13.216s+1}{32.928s+1} \quad (4.24)$$

- Feedforward para la humedad exterior.

$$\frac{-3.249}{3.355} \frac{13.216s+1}{29.122s+1} \quad (4.25)$$

El esquema realizado en Simulink se muestra a continuación (figura 4.152):

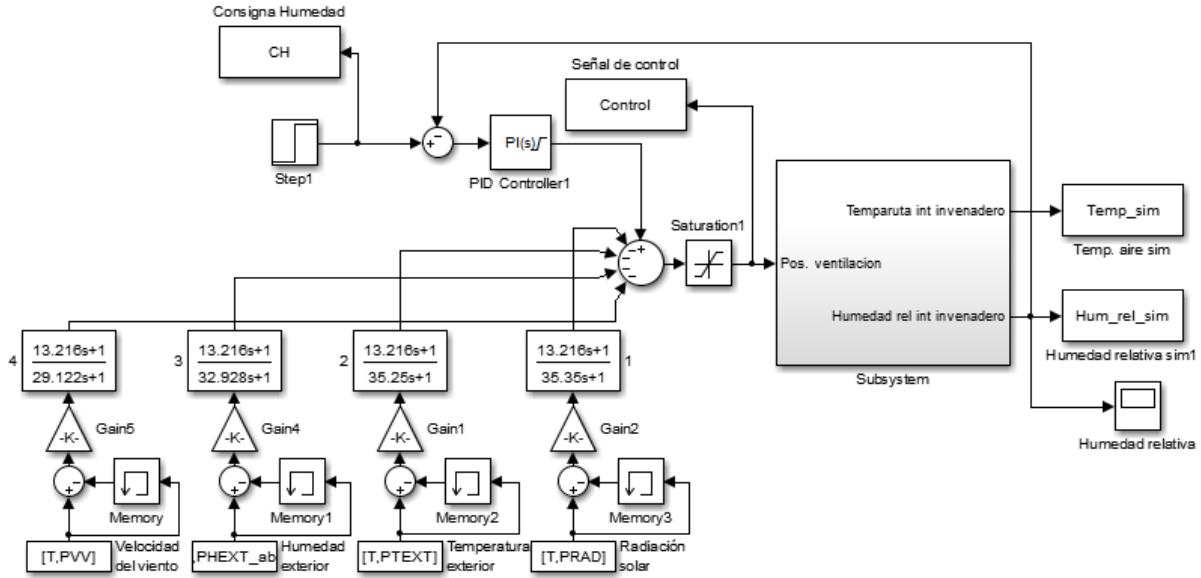


Figura 4.152 Esquema de control de humedad con feedforward

Al resultado total de la señal de control y de los feedforward es necesario añadirle un bloque de saturación para que no supere el 100% ni esté por debajo del 0% (límites de la ventilación).

Los resultados de este control se muestran en las siguientes figuras.

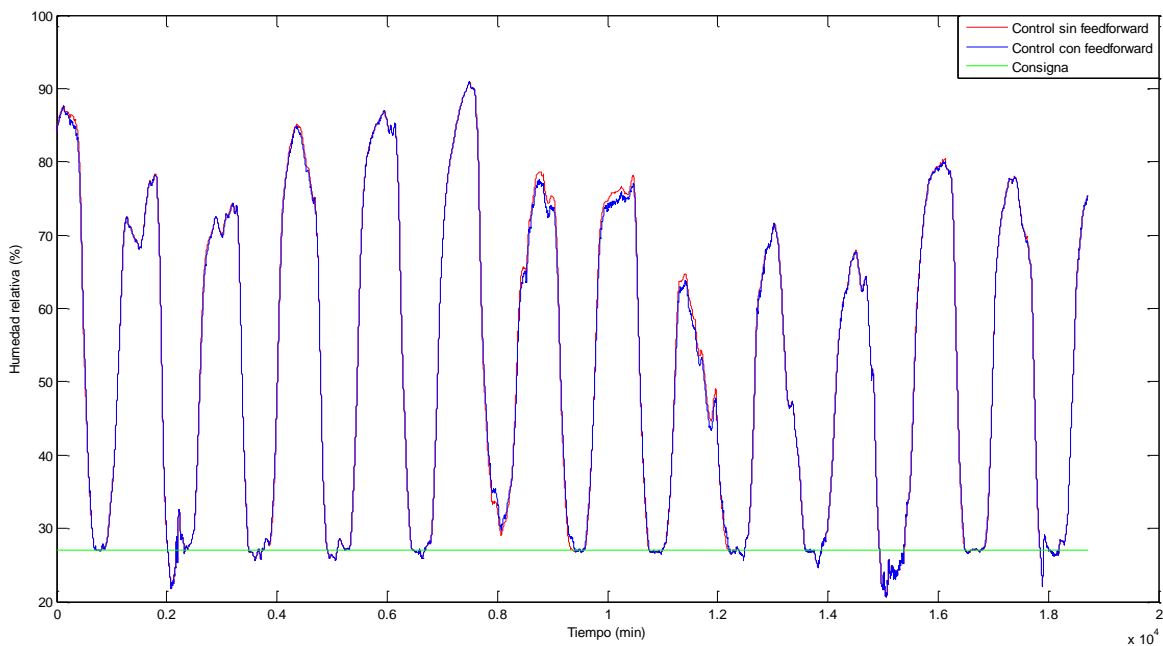


Figura 4.153 Control de humedad con feedforward

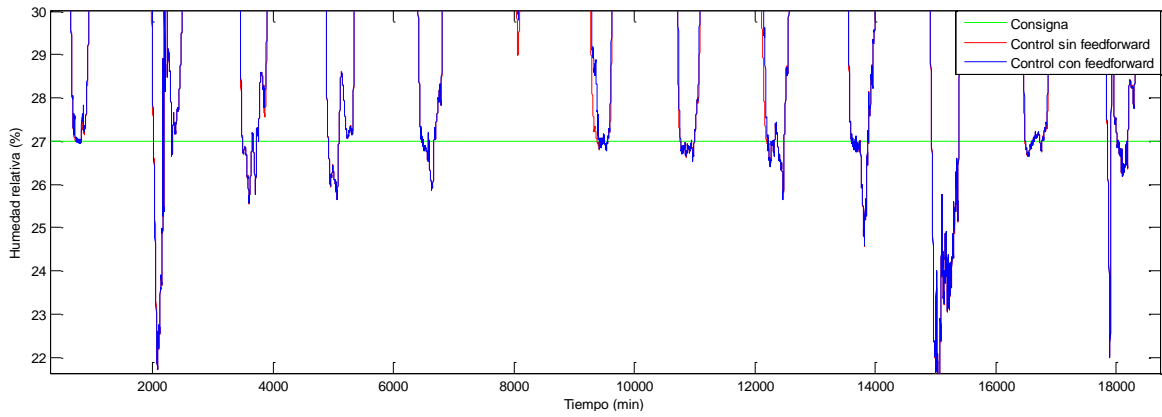


Figura 4.154 Control de humedad ampliado

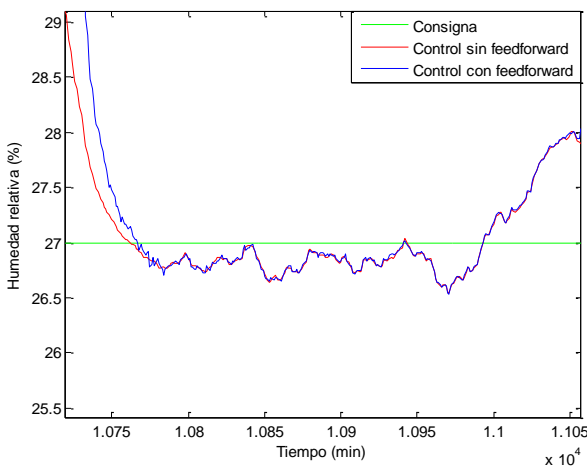


Figura 4.155 Control de humedad del día 1

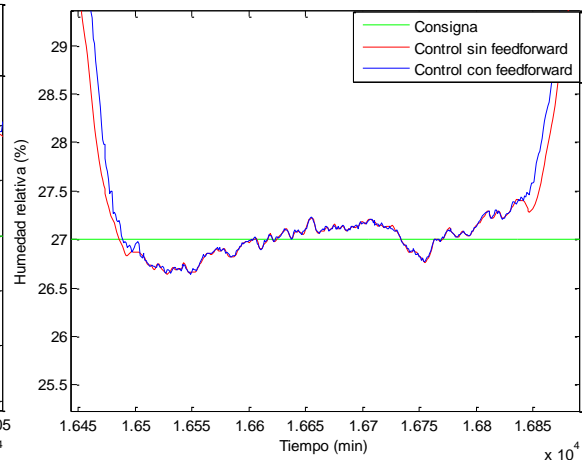


Figura 4.156 Control de humedad del día 3

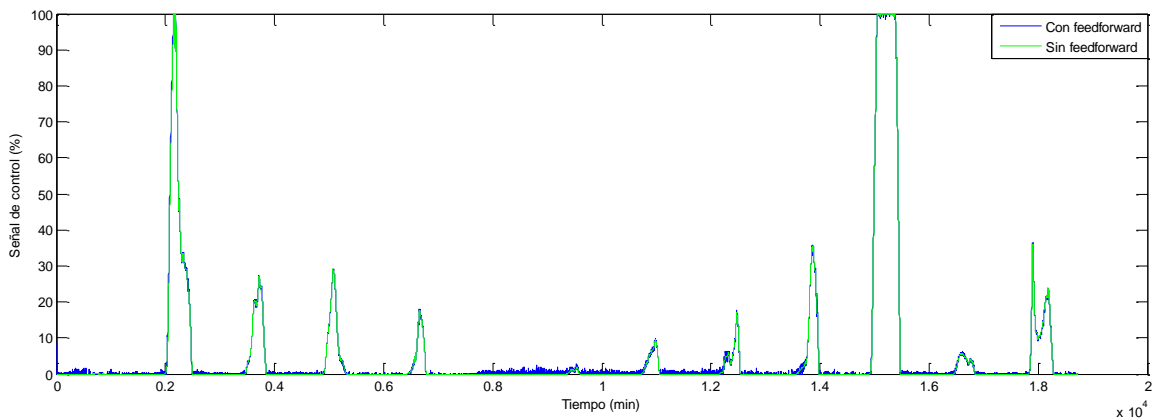


Figura 4.157 Señal de control con feedforward

La primera gráfica (figura 4.154) muestra la humedad relativa con un controlador PI (color rojo), la humedad relativa con un controlador PI y control anticipativo (color azul) y la consigna establecida en el 27% (color verde). Las tres siguientes gráficas (figura 4.155, 4.156 y 4.157) son ampliaciones de esta primera, realizadas para observar mejor las respuestas. Aunque en

la imagen no se aprecia correctamente la diferencia, añadir el control anticipativo mejora un 2.22% la respuesta respecto a la consigna.

La última gráfica (figura 4.158) representa la señal de control. Se puede apreciar como a la señal del controlador PI se le suma el efecto de las perturbaciones, de manera que cuando llega una perturbación, el controlador tiene información sobre esta y actúa en consecuencia.

4.2.3 Control selectivo.

Tras haber controlado la temperatura y la humedad relativa por separado, en este apartado se propone la idea de controlar las dos a la vez, utilizando una estrategia de control selectivo. El control selectivo se utiliza cuando se dispone de diversos reguladores con objetivos diferentes, pero sólo se cuenta con un actuador a trabajar sobre una única variable manipulada [2]. Para controlar el invernadero solo se dispone de la ventilación como variable de control y se desea controlar la temperatura y humedad, por lo que este tipo de control es ideal. Para ello se utilizarán los controladores PI y los feedforward calculados en los apartados anteriores.

La idea consiste en dar prioridad al control de la temperatura (variable principal del sistema) y cuando esta se encuentre dentro de un rango β , definido previamente, entrará en funcionamiento el control de la humedad relativa.

El esquema implementado en Simulink se muestra a continuación (figura 4.158):

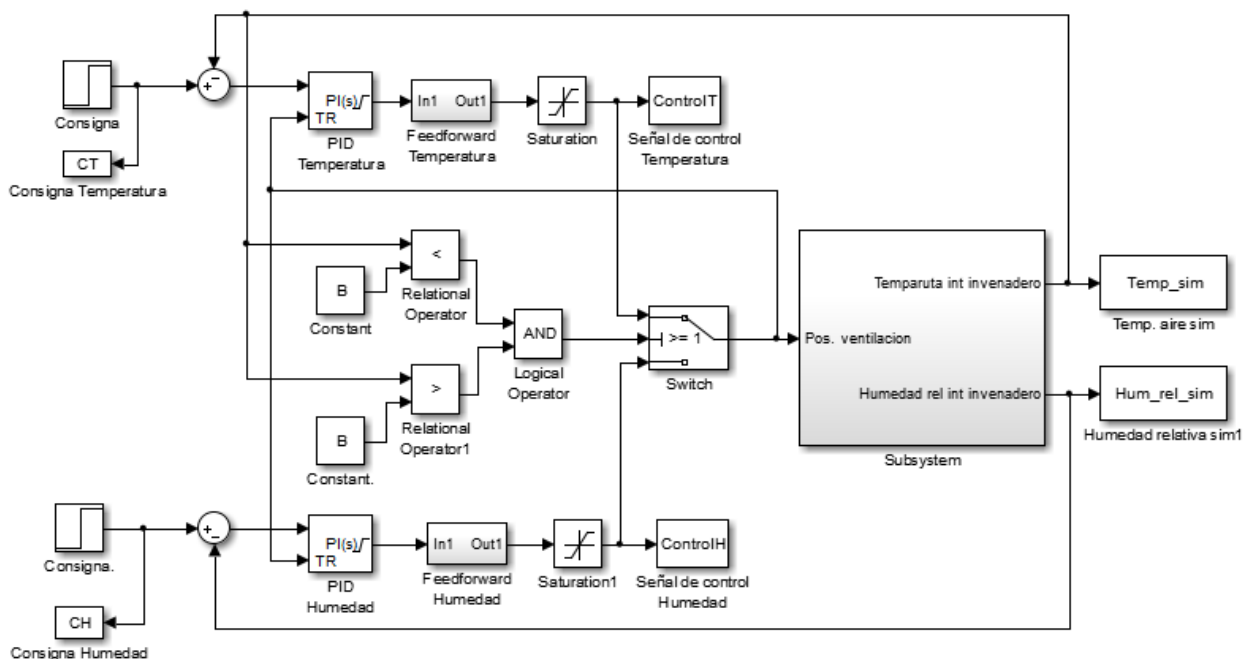


Figura 4.158 Esquema de control selectivo

Hay que destacar que los controladores tienen implementado un sistema anti-windup, al igual que los anteriores, y en este caso, además, llevan un sistema de transferencia sin saltos (figura 4.159).

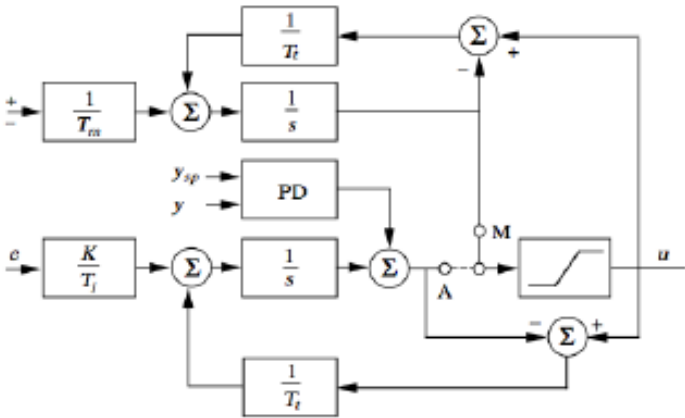


Figura 4.159 Esquema de transferencia sin saltos

Este esquema es muy utilizado en controladores PID industriales y se utiliza para evitar el problema que surge cuando se produce la conmutación de un controlador a otro y que puede provocar cambios bruscos en la señal de control.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

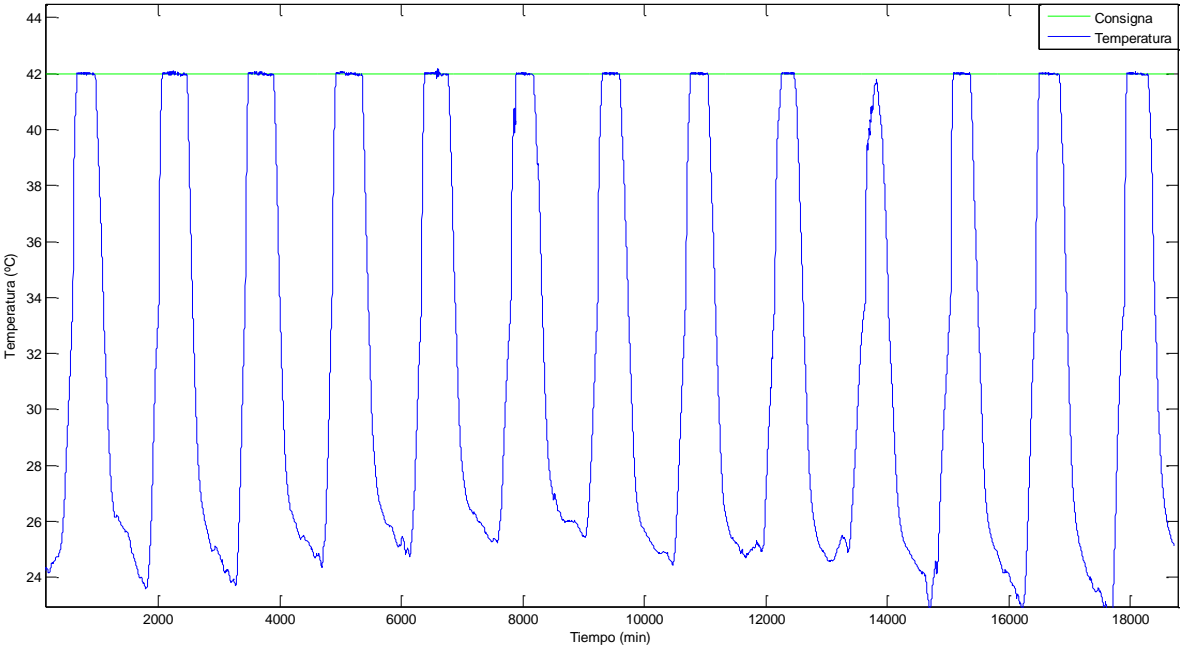


Figura 4.160 Control de temperatura

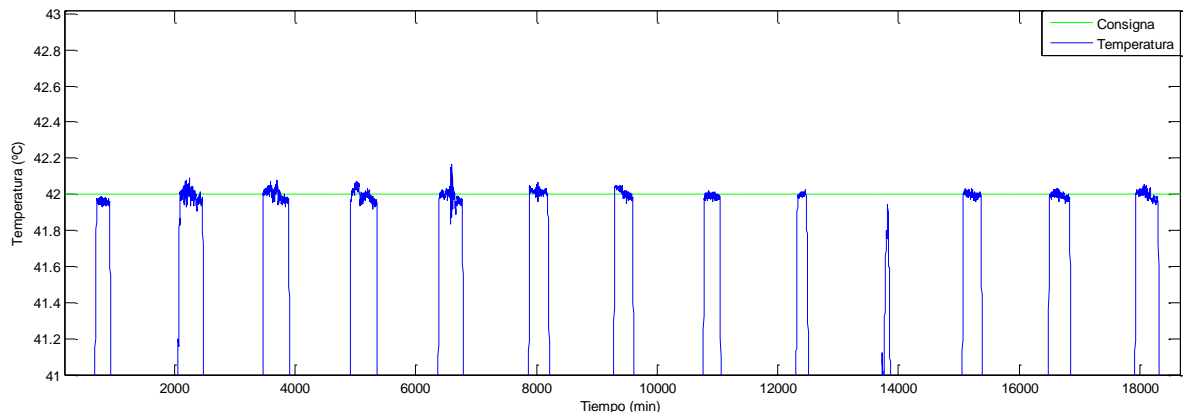


Figura 4.161 Control de temperatura ampliado



Figura 4.162 Control de humedad

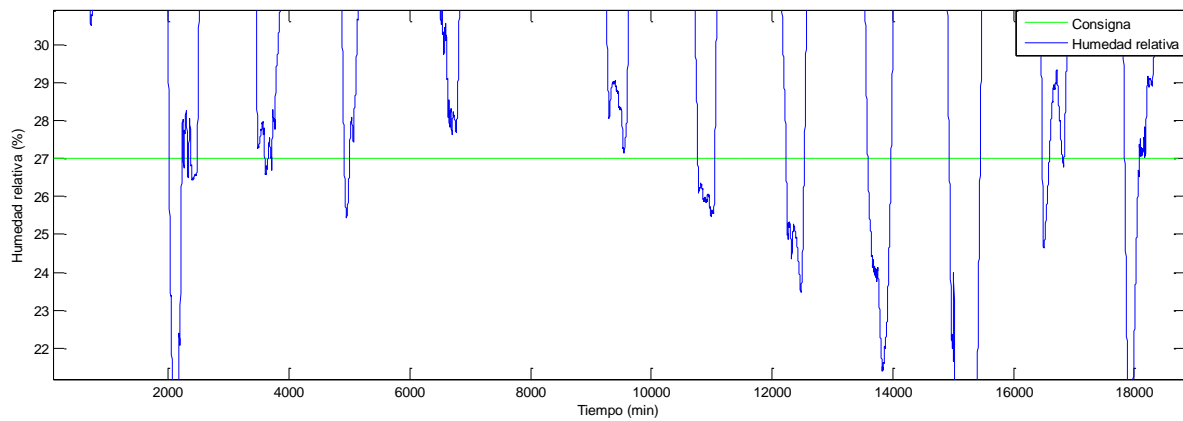


Figura 4.163 Control de humedad ampliado

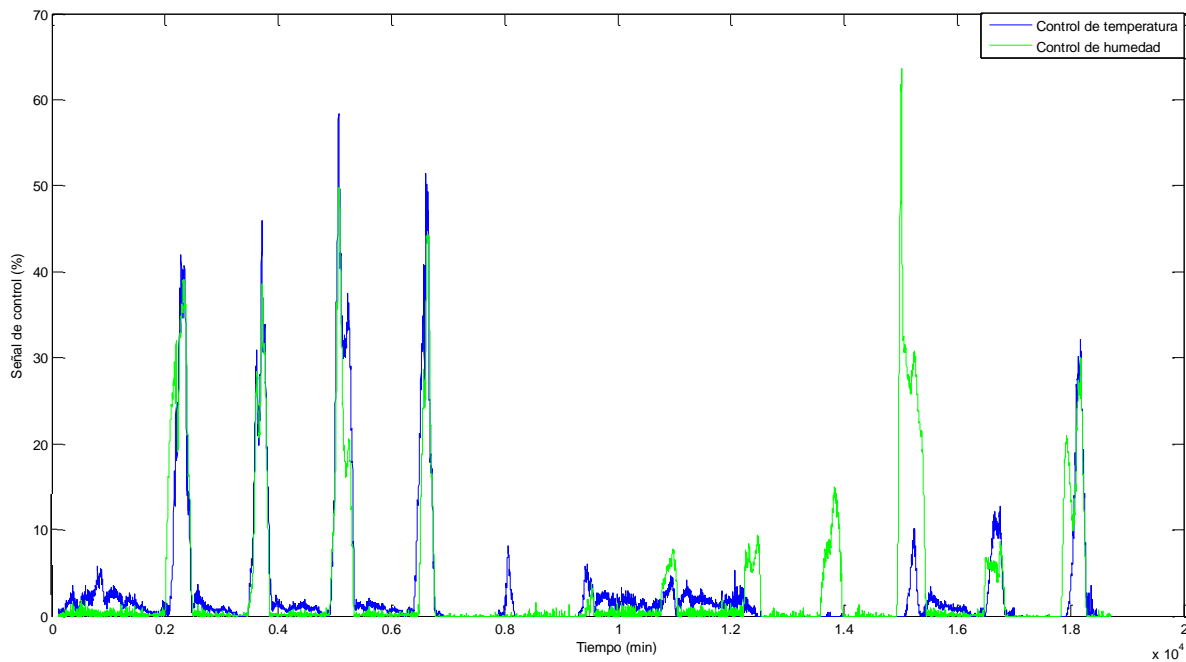


Figura 4.164 Señales de control

La primera gráfica (figura 4.160) representa la temperatura controlada (color azul) y la consigna establecida en 42 °C (color verde). La figura 4.161 es una ampliación de la primera. Se puede apreciar como el control de esta variable es muy similar al control realizado anteriormente, en el que sólo se controlaba la temperatura. Esto se debe a que mediante el control selectivo se le ha dado prioridad a esta variable, de manera que no se controle la humedad relativa hasta que la temperatura no esté dentro de un rango β , en este caso de un grado por encima de la consigna y seis por debajo (43 y 36 °C). La elección de este rango se debe a que los días 9 y 10 tienen temperaturas inferiores a los demás días y si no se coge un rango inferior tan amplio, al entrar en funcionamiento el controlador de la humedad, la temperatura no llegará a alcanzar la deseada (42 °C). Este rango puede cambiarse en cualquier momento si se desea un mayor control de la humedad. También podría haberse solucionado este problema bajando la consigna de temperatura.

En la tercera gráfica (figura 4.162) se muestra la humedad relativa (color azul) y su consigna (color verde), establecida en el 27%. La figura 4.163 muestra una ampliación de esta. Como el control de la temperatura tiene prioridad, y el rango establecido es bastante grande, el control de la humedad es peor que el que se daba cuando solo se controlaba la humedad. Además, al ser el lazo de control secundario, se producen algunas perturbaciones como consecuencia del control de la temperatura. Teniendo en cuenta todo esto, el control es bastante bueno en la mayoría de los días.

La última gráfica (figura 4.164) muestra la señal de control de la temperatura (color azul) y de la humedad (color verde). Aquí se puede apreciar cuando actúa cada controlador. En los días 2 y 11, que son los que peor control de humedad tienen, se puede ver que los esfuerzos del controlador son mayores que en el resto de los días.

Para poder comprobar el efecto que causa el rango β sobre el control, a continuación se comparan el control de temperatura y humedad obtenido para el rango utilizado anteriormente con el control para dos rangos distintos (de 38 °C a 43 °C y de 40 °C a 44 °C).

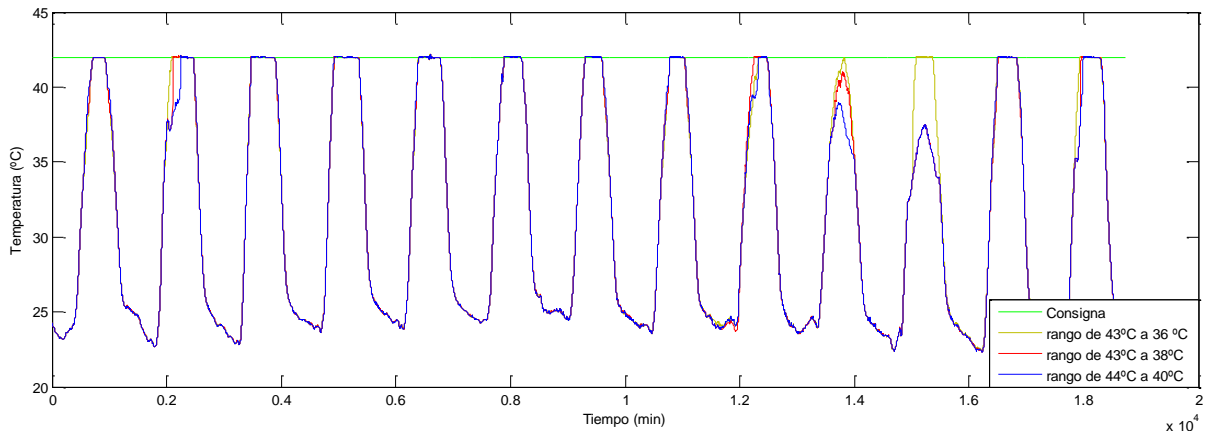


Figura 4.165 Comparación de rangos en la temperatura

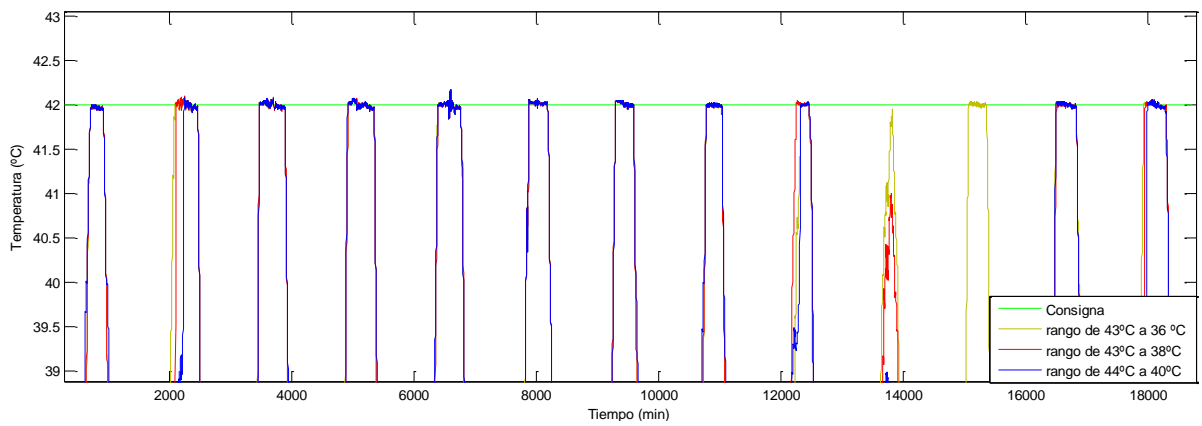


Figura 4.166 Ampliación de la comparación de rangos en la temperatura

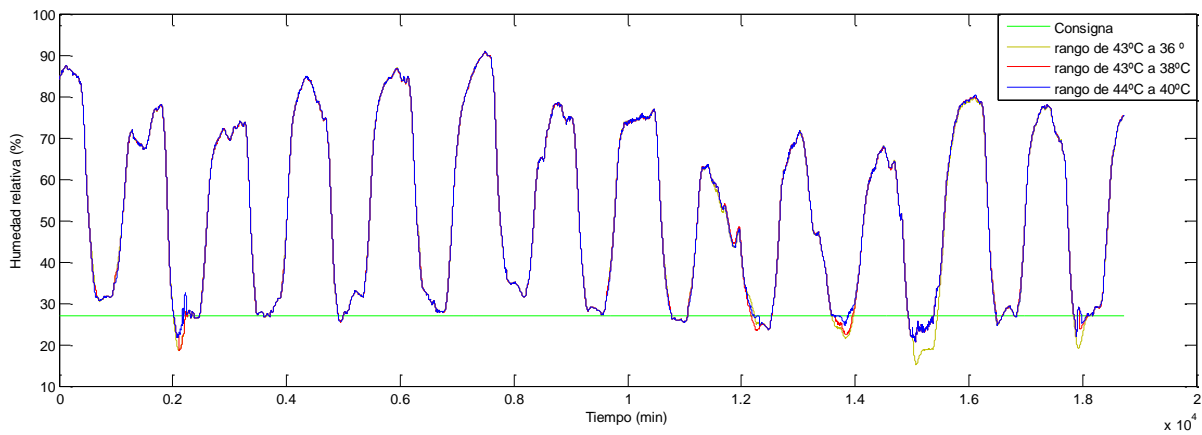


Figura 4.167 Comparación de rangos en la humedad relativa

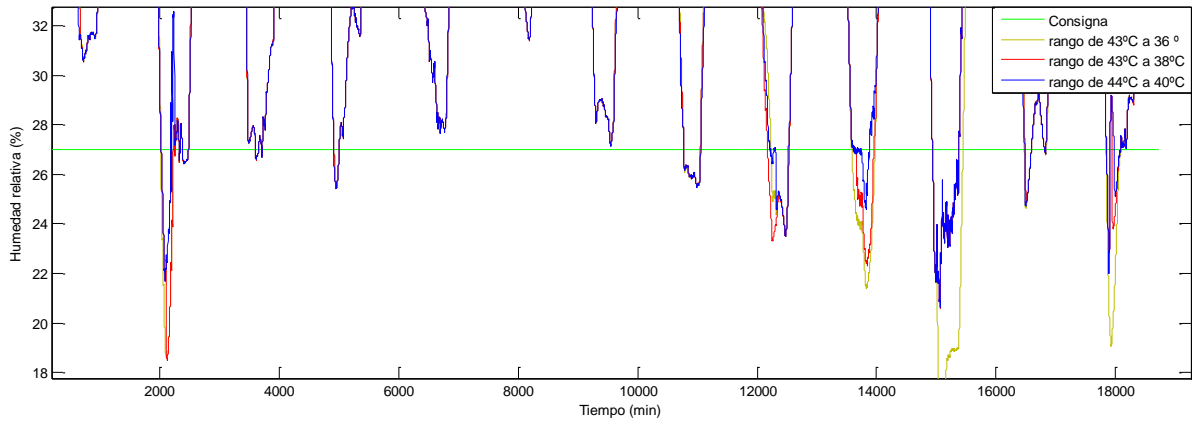


Figura 4.168 Ampliación de la comparación de rangos en la humedad relativa

Las figuras 4.165 y 4.166 presentan la temperatura para una β de 36 a 43°C (color amarillo), de 38 a 43°C (color rojo) y de 40 a 44°C (color azul) y la consigna (color verde). Las figuras 4.167 y 4.168 presentan la humedad relativa para una β de 36 a 43°C (color amarillo), de 38 a 43°C (color rojo) y de 40 a 44°C (color azul) y la consigna (color verde).

Se puede ver que a medida que aumenta el control sobre la humedad relativa se pierde el control de la temperatura. Los días 10 y 11 alcanzan menores temperaturas que el resto de días y al aumentar el valor inferior del rango β , el control de la humedad actúa durante más tiempo y no permite que se alcancen los valores deseados de temperatura. Sin embargo, la humedad mejora su respuesta.

Hay que establecer una relación de compromiso para tratar de realizar el mejor control sobre ambas variables, maximizando el ajuste de cada una según convenga.

4.2.1 Comparación de controladores.

Las siguientes figuras muestran una comparación del control selectivo con tres rangos distintos con los controles individuales de temperatura y humedad.

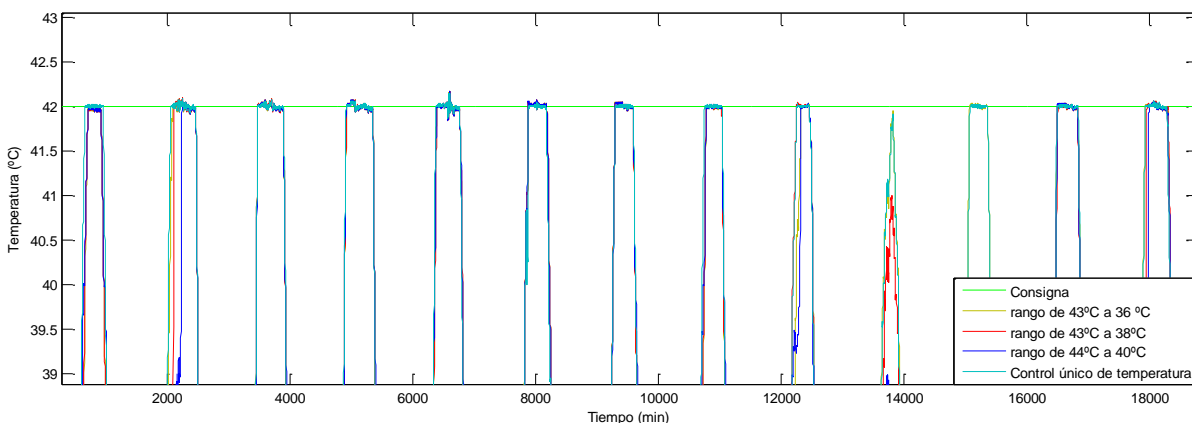


Figura 4.169 Comparación de controladores para temperatura

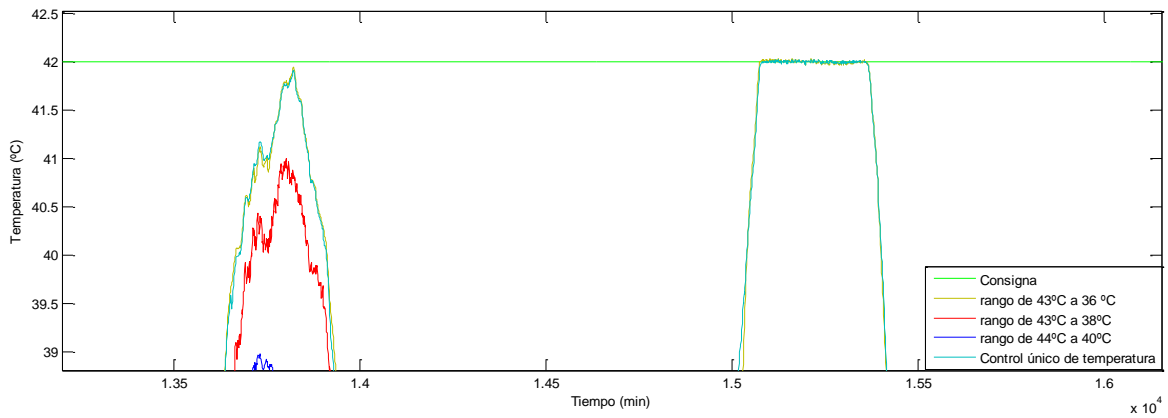


Figura 4.170 Control de temperatura en los días 10 y 11

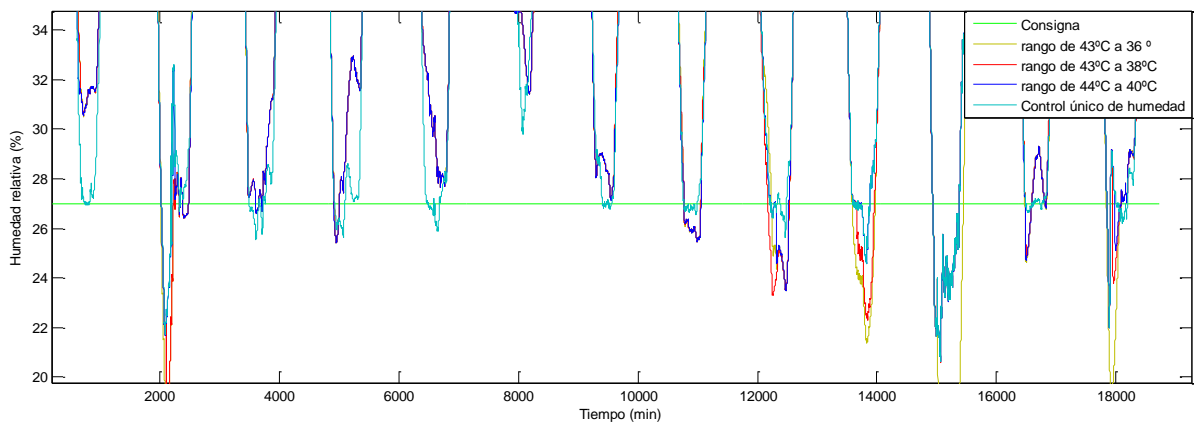


Figura 4.171 Comparación de controladores para humedad

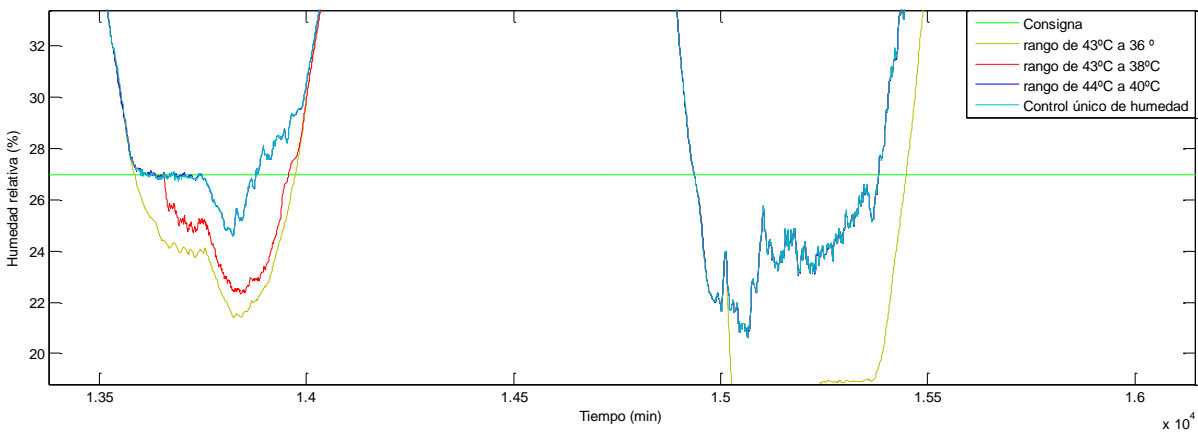


Figura 4.172 Control de humedad en los días 10 y 11

Las figuras 4.169 y 4.170 representan la temperatura para una β de 36 a 43°C (color amarillo), de 38 a 43°C (color rojo) y de 40 a 44°C (color azul oscuro), la consigna (color verde) y la temperatura cuando el único control realizado es el de la temperatura (color azul claro).

Las figuras 4.171 y 4.172 muestran la humedad para una β de 36 a 43°C (color amarillo), de 38 a 43°C (color rojo) y de 40 a 44°C (color azul oscuro), la consigna (color verde) y la humedad cuando el único control realizado es el de la humedad (color azul claro).

Se puede ver que el control único de la temperatura se asemeja bastante al control selectivo cuando β es el rango de 36 a 43°C mientras que en el control único de la humedad ocurre al contrario, como cabía esperar; el control único de la humedad se asemeja más a la respuesta del control selectivo cuando β es el rango de 40 a 44°C. Esto se debe a que cuanto mejor es el control de la temperatura, peor es el de la humedad, y viceversa. Hay que establecer una situación de compromiso entre ambos controles.

Capítulo 5:

Conclusiones y trabajos futuros

En este proyecto se ha presentado el modelado y control de la temperatura y de la humedad relativa en el interior de un invernadero. En los experimentos realizados se ha visto la dificultad que supone modelar este entorno debido principalmente a la cantidad de perturbaciones que afectan al sistema de forma continua y que suponen respuestas no lineales de las variables a controlar. Para poder modelar correctamente las salidas del sistema es necesario escoger días donde la influencia del viento sea lo menor posible y trabajar en torno al medio día solar, donde la mayor parte de las perturbaciones tienen una influencia mínima, en comparación con el resto del día. Esto implica que sólo una pequeña parte de los datos podrá ser utilizada para la obtención de modelos.

Para disminuir el efecto de las perturbaciones en el sistema es necesario estudiar la relación entre cada perturbación y las variables a controlar, como se realizó en el capítulo 4. Sin embargo, estos modelos no resultan demasiados exactos, debido a la fuerte no linealidad del sistema, al igual que ocurre con los modelos del sistema principal. Esto implica que un pequeño cambio en el punto de operación puede provocar grandes cambios a la salida. Para este tipo de cambios podría haberse planteado un método de conmutación entre modelos, de manera que cada uno actuase en su punto de operación, permitiendo un ajuste más adecuado al sistema real. Sin embargo, este tipo de estrategia habría complicado demasiado tanto la obtención de modelos como el control del sistema.

En este proyecto no se han tenido en cuenta estas variaciones provocadas por no linealidades y los modelos se han obtenido como la media aritmética de distintos ensayos realizados a lo largo de 6 días, en los que se ha variado tanto el punto de operación como la amplitud de la entrada. Esto supone una gran simplificación del proceso, pero también una pérdida de precisión. Además, hay que tener en cuenta que la época del año influye en el comportamiento del sistema, por lo que un controlador diseñado para una época del año en concreto, como es el caso de este proyecto, puede empeorar su comportamiento si es utilizado en otra época.

A pesar de todo esto, los ensayos realizados han permitido obtener un modelo aproximado de la temperatura y de la humedad relativa del invernadero, en primer lugar, sin tener en cuenta el efecto de las perturbaciones y posteriormente, teniendo en cuenta las principales perturbaciones del sistema, como son la radiación solar, la temperatura exterior, la humedad absoluta exterior y la velocidad del viento. En ambos casos se han tenido en cuenta las limitaciones del sistema de ventilación en forma de saturación. Estas saturaciones provocan

que la señal de control solo pueda tomar valores entre 0 y 100, que corresponde al porcentaje de apertura de la ventilación.

Como cabría esperar, el uso de las perturbaciones medibles en el sistema de control supone una mejora en las salidas (temperatura y humedad relativa). El control por adelantado permite detectar las variables perturbadoras y tomar una acción de corrección antes de que la variable controlada se desvíe demasiado de la consigna establecida. Esto supone una mejora en el rendimiento del sistema y un ahorro de energía, permitiendo contrarrestar en gran medida la acción de las perturbaciones.

Sin embargo, la forma en la que se han obtenido los modelos del control por adelantado tiene sus inconvenientes. La cancelación de las perturbaciones no es completa si los modelos no son perfectos, por lo que a pesar de añadir este tipo de control, las perturbaciones seguirán teniendo efecto en el sistema, aunque en menor medida.

A partir de los modelos principales del sistema, se han planteado tres estrategias de control.

Control de temperatura. Este sistema de control se centra únicamente en el control de la temperatura. Tiene sentido plantear este tipo de control, ya que la variable que influye principalmente en el crecimiento de los cultivos es la temperatura del invernadero. Este control es el que permite controlar la temperatura de la manera más eficiente, sin embargo, no tiene en cuenta la humedad relativa. Con humedades relativas elevadas se favorece la aparición y desarrollo de enfermedades criptogámicas, además de disminuir la transpiración, lo que reduce la absorción de agua y nutrientes, pudiendo generar déficit de elementos como el calcio. Sin embargo, con humedades relativas bajas, la tasa de transpiración crece, lo que puede acarrear estrés hídrico, el cierre de los estomas y, por tanto, la reducción de la fotosíntesis. En base a estos hechos, es necesario mantener la humedad relativa del aire en un intervalo determinado.

- Control de humedad. Este control solamente actúa sobre la humedad. Esto deja sin control a la temperatura del invernadero, lo cual no resulta demasiado óptimo, siendo la variable principal del sistema. Sin embargo, con este tipo de control se obtienen los mejores resultados de control de la humedad.
- Control selectivo. El último tipo de control surge como la combinación de los dos sistemas de control anteriores. Centrándose en el control de la temperatura del invernadero, permite controlar la humedad relativa cuando la temperatura ya está dentro de un rango deseado. Este rango es ajustable, de manera que permite centrarse con mayor o menor precisión a la consigna. Este tipo de control supone una gran ventaja respecto a los dos anteriores, permitiendo el control de ambas variables en lugar de centrarse en una sola.

En lo referente a trabajos futuros, se destacan las siguientes ideas:

- Debido a la no linealidad dependiendo del punto de operación se plantea la idea de utilizar un método de conmutación entre modelos para distintos puntos de operación, de manera que permitan una mejor aproximación a la dinámica real del sistema.
- Estudio de modelos autorregresivos o de predicción del error que permitan describir mejor la dinámica del proceso y así poder utilizar estrategias de control más avanzadas.
- Diseño e implementación de estrategias de control predictivo que permitan mejorar los resultados obtenidos.

Capítulo 6:

Bibliografía

- [1] Acebo, M. *Instrumentación y control avanzado de procesos*. Instituto superior de energía, España, enero de 2013.
- [2] Angulo, C., Raya, C. *Tecnología de sistemas de control*. Barcelona, septiembre de 2004.
- [3] Åström, K.J. *Introduction to control*. Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, Lund University, 2002.
- [4] Berenguel, M., Guzmán, J.L. Apuntes de la asignatura *Técnicas de control industrial*. 4º curso del grado en ingeniería electrónica industrial, Universidad de Almería, 2014.
- [5] Braslavsky, J. *Un primer curso en control automático*. Ingeniería en Automatización y control industrial, Universidad Nacional de Quilmes, Argentina, 2002.
- [6] Corriou, J.P. *Process Control: Theory and applications*. Springer science & business media.
- [7] Guzmán, J.L. *Diseño multiplataforma y escalable de un sistema de control integrado de riego y clima en invernaderos vía Internet para uso en laboratorios remotos y en sistemas industriales*. Universidad de Almería, junio de 2002.
- [8] Kamp, P.G., Timmerman, G.J. *Computerized environmental control in greenhouses*. A step by step approach. IPC Plant, Holanda, 1996.
- [9] Liptak, B.G. *Instrument Engineers' Handbook (Volume 2)*. Estados Unidos, 1999.
- [10] Mathworks. *Matlab*. Web: <http://www.mathworks.es/products>
(Última consulta: 02/09/2014)
- [11] Mendiburu, H.A. *Aplicación de la automatización industrial y el control de procesos, en la protección y conservación del Medio Ambiente*. Lima, Perú, 2003.
- [12] Proporcional, integral y derivativo. Web:
http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo#Proporcional
(Última consulta:02/09/2014)
- [13] Ramírez, A. *Control jerárquico multiobjetivo de crecimiento de cultivos bajo invernadero*. Almería. 2005.
- [14] Rodríguez, C., Guzmán, G.L., Berenguel, M. *Una metodología para el diseño de un controlador PI no-lineal. Aplicación a un sistema de tanques*. Universidad de Almería.

[15] Rodríguez, F. *Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero*. Tesis doctoral, Universidad de Almería, noviembre de 2002.

[16] Rodríguez, F., Berenguel, M. *Control y robótica en agricultura*. Universidad de Almería, Almería, 2004.

[17] Rodríguez, F., Guzmán, J.L. Apuntes de la asignatura *Automatización industrial*, Universidad de Almería (2012).

[18] Vázquez, F. *Diseño de Controladores PID para Sistemas MIMO con Control Descentralizado*. Tesis doctoral, UNED, 2001.