



**UNIVERSIDAD DE ALMERÍA**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA**

**TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO AGRÍCOLA EN MECANIZACIÓN  
Y CONSTRUCCIONES RURALES**

**EVALUACIÓN DE UN NUEVO PANEL RADIANTE  
ALTAMENTE EFICIENTE COMO SISTEMA DE  
CALEFACCIÓN PARA INVERNADEROS**

**ALUMNO:**

**Encarnación Aguado Donaire**

**DIRECTOR:**

**D. Diego L. Valera Martínez**

**ALMERÍA, JULIO DE 2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quería agradecer a D. Diego Luís Valera Martínez la oportunidad de haber podido realizar este proyecto y por su dirección. Igualmente a Patricia Marín por el tiempo dedicado, paciencia y por las facilidades que me ha proporcionado para llevar el trabajo a buen fin.

También me gustaría mencionar a mi familia, en especial a mis padres y hermana, por todo el apoyo que me ha dado durante todos estos años de estudio.

Por último, a mis compañeros y amigos, por la ayuda y ánimos que en todo momento me han dado.





## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
ÍNDICE.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	2
2. OBJETIVOS.....	6
2.1. Objetivos.....	7
3. ANTECEDENTES.....	8
3.1. Eficiencia energética.....	9
3.2. Eficiencia energética en España.....	11
3.3. Concepto de cultivo protegido.....	13
3.4. Los cultivos en invernadero en el área Mediterránea.....	14
3.5. Contexto de la producción bajo invernadero.....	19
3.6. Ahorro energético en la calefacción.....	21
3.7. Influencia de las temperaturas en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.....	22
3.8. Balance de la radiación en el invernadero.....	26
3.9. Balance energético en un invernadero.....	29
3.10. Sistemas de calefacción.....	42
3.10.1. Sistemas de calefacción utilizados en la provincia de Almería.....	42
3.10.2. Tipos de sistemas de calefacción.....	43
3.10.2.1. Calefacción de tipo convectivo.....	43
3.10.2.1.1. Generadores de aire caliente por combustión directa....	46
3.10.2.1.2. Aparatos equipados con un cambiador de calor.....	49
3.10.2.1.3. Generadores de aire caliente por combustión indirecta.....	49
3.10.2.2. Control de los sistemas de calefacción por aire caliente.....	51
3.10.2.2.1. Potencia de calefacción.....	51
3.10.2.3. Sistemas de calefacción por conducción.....	52
3.10.2.4. Sistemas de calefacción por convección- radiación.....	53
3.10.2.4.1. Sistemas de calefacción por agua caliente.....	53





3.10.2.5. Control de los sistemas de calefacción por agua caliente.....	55
3.10.2.5.1. Potencia de calefacción.....	55
3.10.2.5.2. Tuberías.....	56
3.10.2.5.3. Energía transmitida desde las tuberías de calefacción.....	58
3.10.2.5.3.1. Transferencia de calor por convección.....	59
3.10.2.5.3.2. Transferencia de calor por radiación.....	62
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	65
4.1. Descripción.....	66
4.1.1. Epipremnum aureum.....	68
4.1.2. Paneles radiantes EyCA.....	70
4.1.3. Cámara termográfica Thermo-VisionTM A40-M.....	73
4.1.4. Sensores de contacto.....	77
4.1.5. Registradores autónomos de temperatura.....	78
4.1.6. ThermaCAMTM Researcher Pro 2.8 S.....	80
4.1.7. Diseño experimental.....	82
4.1.8. Polímetros.....	84
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	86
5.1. Paneles.....	87
5.1.1. Panel de abajo vs. Panel de arriba.....	87
5.1.1.1. Alimentación regulada.....	88
5.1.1.2. Sin alimentación regulada.....	91
5.1.2. Dos paneles vs. Un solo panel.....	93
5.1.2.1. Alimentación regulada.....	94
5.1.2.2. Sin alimentación regulada.....	97
5.2. Plantas delante y detrás.....	100
5.2.1. Panel de abajo.....	100
5.2.1.1. Incrementos de temperatura.....	101
5.2.1.2. Diferencias térmicas entre la zona de máxima radiación y sombreado.....	104
5.2.1.3. Diferencias térmicas entre la zona de máxima radiación y sombreado a distintas potencias.....	106
5.2.1.4. Registro de la temperatura radiada por los paneles a partir de los hobs y sensores.....	107
5.2.2. Dos paneles.....	109
5.2.2.1. Incrementos de temperatura.....	110
5.2.2.2. Diferencias térmicas entre la zona de máxima radiación y sombreado.....	113
5.2.2.3. Diferencias térmicas entre la zona de máxima radiación y sombreado a distintas potencias.....	116



5.3.Comparación térmica de las distintas distancias con respecto a los paneles.....	117
5.3.1. Dos paneles.....	117
5.3.1.1.Incrementos de temperatura.....	118
5.3.1.2. Diferencias térmicas.....	122
5.3.1.2.1. A 95cm contraste térmico entre la zona delantera y trasera, superior e inferior de las plantas.....	123
5.3.1.2.1.1.Parte delantera, diferencia térmica entre el punto superior e inferior.....	124
5.3.1.2.1.2.Parte trasera, diferencia térmica entre el punto superior e inferior.....	125
5.3.1.2.2. A 220cm contraste térmico entre la zona delantera y trasera, superior e inferior de las plantas.....	126
5.3.1.2.2.1.Parte delantera, diferencia térmica entre el punto superior e inferior.....	128
5.3.1.2.2.2.Parte de detrás, diferencia térmica entre el punto superior e inferior.....	128
5.3.1.2.3. Diferencia térmica de las dos posiciones a distintas potencias.....	129
5.3.2. Panel de abajo.....	133
5.3.2.1.Diferencias térmicas.....	133
5.3.2.1.1. A 95cm contraste térmico entre la zona delantera y trasera, superior e inferior de las plantas.....	133
5.3.2.1.1.1.Parte delantera, diferencia térmica entre el punto inferior y superior.....	135
5.3.2.1.1.2.Parte trasera, diferencia térmica entre el punto inferior y superior.....	137
5.3.2.1.2. A 220cm contraste térmico entre la zona delantera y trasera, superior e inferior de las plantas.....	138
5.3.2.1.2.1.Parte delantera, diferencia térmica entre el punto inferior y superior.....	139
5.3.2.1.2.2.Parte trasera, diferencia térmica entre el punto inferior y superior.....	140
5.3.2.1.3. Diferencia térmica de las dos posiciones a distintas potencias.....	141
5.4.Conclusiones discusión.....	144
6. CONCLUSIONES.....	146
6.1.Conclusiones.....	147
7. BIBLIOGRAFÍA.....	148
7.1.Bibliografía.....	149



## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Imagen del “mar de plástico” de Almería.....	15
Figura 2. Superficie de invernaderos por países en la cuenca mediterránea.....	16
Figura 3. Distribución de la superficie de invernaderos en España Campaña 1998/99.....	17
Figura 4. Evolución de la superficie ocupada por invernaderos.....	18
Figura 5. Balance energético en un invernadero.....	30
Figura 6. Instalaciones de calefacción en número de invernaderos y en superficie.....	42
Figura 7. Distribución de los sistemas de calefacción por aire caliente en Almería.....	43
Figura 8. Calefactor por generación de aire caliente directo.....	47
Figura 9. Sistema con combustión directa.....	48
Figura 10. Distribución del calor mediante mangas perforadas de polietileno para un sistema de combustión indirecto.....	50
Figura 11. Vista de la ubicación del ensayo en el laboratorio.....	66
Figura 12. Perspectiva lateral de la ubicación del ensayo en el laboratorio.....	67
Figura 13. <i>Epipremnum aureum</i> .....	68
Figura 14. Paneles radiantes MN.....	70
Figura 15. Cámara de interfaces.....	74
Figura 16. Hobos.....	78



Figura 17. Pantalla principal del ThermaCAMTN Pro 2.8S.....	80
Figura 18. Esquema de trabajo ensayo nº 2.....	82
Figura 19. Esquema de trabajo ensayo nº 3.....	83
Figura 20. Polímetro.....	84
Figura 21. Imagen termográfica, ensayo panel de abajo.....	87
Figura 22. Imagen termográfica, ensayo panel de arriba.....	88
Figura 23. Imagen termográfica, ensayo un panel.....	93
Figura 24. Imagen termográfica, ensayo ambos paneles.....	94
Figura 25. Imagen termográfica, ensayo nº2 panel de abajo.....	100
Figura 26. Imagen termográfica, ensayo nº2 dos paneles conectados.....	109
Figura 27. Imagen termográfica, ensayo nº4.....	117
Figura 28. Imagen termográfica ensayo nº3, dos paneles con regulación.....	123
Figura 29. Imagen termográfica ensayo nº5, dos paneles con regulación.....	127
Figura 30. Imagen termográfica ensayo nº3, un panel con regulación.....	134
Figura 31. Imagen termográfica ensayo nº3, un panel con regulación.....	139



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de consumo de energía de los distintos sectores productivos, comparando España con la Unión Europea.....	12
Tabla 2. Coeficientes de absorción de una cubierta vegetal para la radiación solar y térmica en función del índice de área foliar. (Stanghellini, 1987).....	31
Tabla 3. Valores de albedo para diferentes superficies de suelo. (Elias y Castelví, 1996).....	32
Tabla 4. Absortividad ( $\alpha$ ), emisividad ( $\varepsilon$ ), transmisividad ( $\tau$ ) y reflectividad $\delta$ para diferentes tipos de radiación; coeficiente de pérdidas de calor ( $U$ ) y densidad ( $\rho_c$ ) de los materiales comúnmente utilizados como cubierta de invernaderos.....	33
Tabla 5. Conductividad térmica de algunos materiales de cubierta, $\lambda_c$ .....	35
Tabla 6. Fórmulas empíricas para el coeficiente de convección exterior determinadas por varios autores.....	35
Tabla 7. Tasas de renovación de aire por infiltración a través de la estructura (ASAE, 2003).....	37
Tabla 8. Valores del coeficiente de efecto eólico determinados por algunos autores.....	38
Tabla 9. Valores del coeficiente adimensional de caída de presión determinados por algunos autores.....	39
Tabla 10. Conductividad térmica de algunos tipos de suelo, $K_s$ .....	41
Tabla 11. – Transferencia de calor, en vatios por metro lineal de tubo de calefacción, a varias diferencias de temperatura entre el tubo y el aire del invernadero (Adaptado de Van de Braak, 1995).....	57
Tabla 12. Valores de los coeficientes $c_a$ y $n$ según la situación exterior, $h_0$ , también se puede determinar, para el caso de flujo de laminar en tuberías de calefacción, mediante la expresión (Hollman, 1992).....	61
Tabla 13. Valores de la emisividad para algunos materiales utilizados en tuberías de calefacción (adaptado de Mills, 1995).....	62
Tabla 14. Características de la cámara de interfaces.....	76



Tabla 15. Características hobs.....	78
Tabla 16. Clasificación de los puntos a 95cm con ambos paneles conectados, ensayo n°3.....	123
Tabla 17. Clasificación de los incrementos térmicos a 95cm, con ambos paneles conectados, ensayo n°3.....	126
Tabla 18. Clasificación de los puntos a 220cm con ambos paneles conectados, ensayo n°5.....	126
Tabla 19. Clasificación de los incrementos térmicos a 220cm, con ambos paneles conectados, ensayo n°5.....	129
Tabla 20. Clasificación de los incrementos térmicos a 95cm y 220cm, con ambos paneles conectados.....	130
Tabla 21. Clasificación de los puntos a 95cm con un panel conectado, ensayo n°3.....	133
Tabla 22. Clasificación de las diferencias térmicas de la planta a 95cm de la parte delantera con un panel y ambos paneles, ensayo n°3.....	136
Tabla 23. Clasificación de los incrementos térmicos a 95cm, con un panel conectado, ensayo n°3.....	137
Tabla 24. Clasificación de las diferencias térmicas de la planta a 95cm de la parte trasera con un panel y ambos paneles, ensayo n°3.....	138
Tabla 25. Clasificación de los puntos a 220cm con un panel conectado, ensayo n°5.....	138
Tabla 26. Clasificación de los incrementos térmicos a 220cm, con un panel conectado, ensayo n°5.....	140
Tabla 27. Clasificación de los incrementos térmicos a 95 y 220cm, con un panel conectado.....	141



## INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Panel de abajo con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.....	89
Gráfica 2. Panel de arriba con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.....	89
Gráfica 3. Panel de abajo con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	90
Gráfica 4. Panel de arriba con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	90
Gráfica 5. Panel de abajo con alimetación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la intensidad.....	90
Gráfica 6. Panel de arriba con alimetación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la intensidad.....	90
Gráfica 7. Panel de abajo sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.....	91
Gráfica 8. Panel de arriba sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.....	91
Gráfica 9. Panel de abajo sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	92
Gráfica 10. Panel de arriba sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	92
Gráfica 11. Panel de abajo sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	92
Gráfica 12. Panel de arriba sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	92
Gráfica 13. Dos paneles con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.....	95



Gráfica 14. Un solo panel con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.....	95
Gráfica 15. Dos paneles con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	96
Gráfica 16. Un solo panel con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	96
Gráfica 17. Dos paneles con alimetación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la intensidad.....	96
Gráfica 18. Un solo panel con alimetación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la intensidad.....	96
Gráfica 19. Dos paneles sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.....	97
Gráfica 20. Un solo panel sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.....	97
Gráfica 21. Dos paneles sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	98
Gráfica 22. Un solo panel sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.....	98
Gráfica 23. Dos paneles sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la tensión.....	99
Gráfica 24. Un solo panel sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la tensión.....	99
Gráfica 25. Zona de máxima radiación, panel de abajo, plantas delante y detrás.....	101
Gráfica 26. Zona de sombreado, panel de abajo, plantas delante y detrás.....	102
Gráfica 27. Zona de máxima radiación, panel de abajo al 25%, plantas delante y detrás.....	103
Gráfica 28. Zona de sombreado, panel de abajo al 25%, plantas delante y detrás....	103





Gráfica 29. Plantas delante y detrás con el panel de abajo, potenciómetro al 25%.....	104
Gráfica 30. Plantas delante y detrás con el panel de abajo, potenciómetro al 100%.....	105
Gráfica 31. Puntos a distintas potencias, panel de abajo, plantas delante y detrás.....	106
Gráfica 32. Diferencias térmicas entre ambas zonas, panel de abajo, plantas delante y detrás.....	107
Gráfica 33. Temperatura ambiente de la maceta nº1.....	108
Gráfica 34. Sensores planta nº1, ensayo panel de abajo.....	108
Gráfica 35. Zona de máxima radiación, dos paneles, plantas delante y detrás.....	110
Gráfica 36. Zona de sombreado, dos paneles, plantas delante y detrás.....	111
Gráfica 37. Zona de máxima radiación, dos paneles al 25%, plantas delante y detrás.....	112
Gráfica 38. Zona de sombreado, dos paneles al 25%, plantas delante y detrás.....	112
Gráfica 39. Plantas delante y detrás con ambos paneles, potenciómetro al 25%.....	113
Gráfica 40. Plantas delante y detrás con ambos paneles, potenciómetro al 100%.....	114
Gráfica 41. Puntos a distintas potencias con ambos paneles, plantas delante y detrás.....	115
Gráfica 42. Diferencias térmicas entre ambas zonas, dos paneles, plantas delante y detrás.....	116
Gráfica 43. Incremento de temperatura a 95cm, ambos paneles.....	118
Gráfica 44. Incremento de temperatura a 95cm, ambos paneles.....	119
Gráfica 45. Incremento de temperatura a 158cm, ambos paneles.....	120



Gráfica 46. Incremento de temperatura a 158cm, ambos paneles.....	120
Gráfica 47. Incremento de temperatura a 220cm, ambos paneles.....	121
Gráfica 48. Incremento de temperatura a 220cm, ambos paneles.....	122
Gráfica 49. Diferencia térmica zona delantera 95cm, ambos paneles conectados....	124
Gráfica 50. Diferencia térmica zona trasera 95cm, ambos paneles conectados.....	125
Gráfica 51. Diferencia térmica zona delantera 220cm, ambos paneles conectados...	128
Gráfica 52. Diferencia térmica zona trasera 220cm, ambos paneles conectados.....	128
Gráfica 53. Diferencias térmicas entre ambas zonas, plantas a 95cm ambos paneles conectados.....	131
Gráfica 54. Diferencias térmicas entre ambas zonas, plantas a 220cm ambos paneles conectados.....	132
Gráfica 55. Diferencia térmica zona delantera 95cm con un panel conectado.....	135
Gráfica 56. Diferencia térmica zona trasera 95cm, un solo panel.....	137
Gráfica 57. Diferencia térmica zona delantera 220cm, con un panel conectado.....	139
Gráfica 58. Diferencia térmica zona trasera 220cm, con un panel conectado.....	140
Gráfica 59. Diferencias térmicas entre ambas zonas.....	142
Gráfica 60. Diferencias térmicas entre ambas zonas.....	143



## **1. INTRODUCCIÓN.**



### 1.1. INTRODUCCIÓN.

---

Como introducción del proyecto Fin de Carrera hablaremos en primer lugar del sistema de producción hortícola en la provincia de Almería. Sólo en ésta provincia existe una superficie invernada cercana a las 30000ha, lo que ha supuesto en el sureste de España una importancia socioeconómica muy relevante. Produce más de la mitad de las frutas y hortalizas de toda la Comunidad Autónoma Andaluza, con una producción final estabilizada en torno a los 2000 millones de euros anuales y es una industria auxiliar muy competitiva en los mercados internacionales. (Valera. 2007)

Todo ello ha supuesto en las últimas décadas una auténtica revolución económica, social y medio ambiental. El incremento de población, la enorme inversión económica y de trabajo por parte del pequeño agricultor, principalmente, así como la utilización de, cada vez más, técnicas de producción agrícola y de gestión de residuos consideradas respetuosas con el medioambiente. Han inducido que ésta producción sea considerada un ejemplo a seguir en numerosas partes del Mundo.

Debido a los procesos de globalización de los mercados y sistemas productivos, los agricultores deben aportar técnicas innovadoras para mantener su capacidad productiva y comercializadora. Se ha producido un cambio en las necesidades y exigencias de los consumidores que, además de demandar mayor calidad en los productos, reclaman un respeto al medio ambiente. Para ello, es necesario conocer mejor el sistema de producción constituido por el invernadero y las plantas cultivadas en su interior, sujeto a un gran número de restricciones climáticas en cuestión de minutos, los precios varían en cuestión de días y las exigencias medio ambientales o productivas evolucionan de una campaña a la siguiente. (Molina F. 2005)

Como consecuencia de todo esto, el consumo energético en los invernaderos es la causa más importante a considerar dentro de los costes de producción, de ahí que se considere prioritaria la optimización energética de estos sistemas. Por otra parte, mejorando el consumo de energía se facilitará el cumplimiento de las regulaciones ambientales y energéticas cada vez más restrictivas que afectan al sector, logrando unos invernaderos más amigables con el medio ambiente a la vez que competitivos en el mercado europeo.

Cabe destacar el papel fundamental que debe tener el uso de la energía en los invernaderos. Por ello debemos conseguir que estén a un precio más competitivo



para los agricultores. Los cuales están padeciendo en las últimas campañas caídas en los precios de venta de sus productos y un incremento generalizado de los costes de producción. Es decir, la energía es un factor de producción muy importante en la horticultura intensiva, fundamentalmente en las zonas frías. En los últimos años los agricultores se ven enfrentados a unos precios de la energía en aumento lo que fomenta la inversión en equipos de ahorro energético. Tanto por razones ambientales como económicas éstos se ven en la necesidad de realizar un uso más eficiente de la energía.

Un uso inadecuado de la energía en los invernaderos compromete a su rentabilidad, y por tanto la generación de empleo. Sin embargo, en tiempos de crisis el sector hortofrutícola, comparativamente con otros sectores, sigue manteniendo un adecuado nivel de empleo. (Valera. 2010)

A mejor estructura y dotaciones, más y mejor podremos defender al cultivo de las inclemencias y garantizar las producciones en precocidad, cantidad y calidad. Como buscamos la rentabilidad no podemos confiar en la suerte y en la bondad climática del año. Para ello se exige un mínimo de profesionalidad.

En estos casos, con buenas estructuras, la calefacción se convierte en la herramienta que nos permite paliar todos estos efectos adversos. Y dentro de este mundo, se abre la posibilidad de usar la calefacción a modo de salva heladas, para mantener un mínimo biológico. Además de mantener una temperatura adecuada de conducción del cultivo. Los consumos energéticos no serán lógicamente los mismos y sus efectos sobre la producción tampoco.

El cultivo de hortalizas en invernaderos en el área mediterránea en la actualidad ofrece su producción prácticamente durante todo el ciclo anual; para ello ha sido necesario adaptar la evolución de la climatología local a las condiciones de crecimiento y desarrollo a las especies que se cultivan.

En los climas templados del sur, las medidas pasivas permiten evitar las condiciones climáticas extremas, ahora bien, la tecnología existente ofrece al agricultor la oportunidad de controlar dinámicamente el proceso de producción y son las exigencias del mercado, las consideraciones sobre la eficiencia en el uso de la energía y los resultados económicos del sistema los que van a marcar la incorporación de tecnología al invernadero.

La situación económica presente es clara; mayor competencia y mayor número de competidores, elevadas inversiones, costes más elevados de materias primas y manos de obra; todo esto obliga a gestionar las explotaciones agrícolas de la forma más racional posible, tanto desde un punto de vista tecnológico como económico.



Las tecnologías actualmente usadas para la calefacción de invernadero, basadas principalmente en combustibles fósiles permiten la adecuada modificación de ambiente interior del mismo pero con unos costes energéticos elevados que se traducen en altas cuantías económicas de producción.

Las técnicas de acondicionamiento climático en invernaderos suelen estar asociadas a algunas estrategias de ahorro de energía, de manera que se pueda minimizar el impacto del consumo de combustible sobre la rentabilidad del cultivo en condiciones óptimas.

Con lo presentado anteriormente se puede detectar que el estado de la tecnología de los invernaderos y las necesidades de rentabilización de los cultivos, asociadas a un planteamiento global de implementar filosofías de eficiencia energética lleva a un cuadro donde la investigación de soluciones económicas y técnicas para la climatización de invernaderos es muy necesaria. Determinar nuevas técnicas o mejorar las existentes para lograr este objetivo es uno de los retos para los profesionales del sector, no sólo por lo mostrado hasta aquí sobre racionalización de consumo de energía sino también por la fuerte presión que sufren los precios de los productos agrarios. En un mercado globalizado reducir costes de producción es un factor determinante para poder rentabilizar los cultivos.

Dada la conveniencia de aumentar el periodo productivo de los invernaderos y de sacar los productos al mercado fuera de la temporada tradicional en otras latitudes, consideramos que una vía importante de investigación en Almería, es la mejora de las estructuras y de los sistemas de climatización de invernaderos, para adecuarlos a nuestras condiciones y realizar un control microclimático del interior de las instalaciones, no sólo en semilleros y cultivos ornamentales, sino también en horticolas.

Con objeto de reducir el consumo energético considerablemente se ha elaborado el panel MINICADIF (MN). Éste está proyectado y diseñado para realizar instalaciones de transferencia térmica económica, eficiente, de mínimas dimensiones y rápida instalación. Además también está destinado para emplearlo en aplicaciones domésticas, restaurantes, explotaciones ganaderas, oficinas, los cuales han dado unos buenos resultados.

El panel MN es una verdadera concentración de tecnología del futuro. Incorpora diseños estructurales y la evolución de nuevos materiales que han permitido obtener un efecto natural, con un nivel ecológico y un resultado de confort medioambiental realmente excelentes.

Transmitir la energía eléctrica absorbida, en forma de energía calorífica, fundamentalmente a los cuerpos sin necesidad de calentar el aire, es la variable



## **Introducción**

---

básica que diferencia a los sistemas de calefacción EyCA. Con este sistema la temperatura ambiente es mucho más homogénea, consiguiendo, por tanto, un importante ahorro energético, además de una temperatura de confort más agradable, más ecológica y económica.



## **2. OBJETIVOS**





### 2.1. OBJETIVOS

---

El objetivo general del Proyecto Fin de Carrera es determinar la viabilidad de un nuevo sistema de calefacción basado en paneles radiantes, en cuanto a consumo y comportamiento de las plantas. El desarrollo del sistema de calefacción se debe caracterizar por su eficiencia además de la sencillez de la instalación.

Para alcanzar los objetivos, se evaluarán los siguientes puntos:

- Estudiaremos el consumo de los paneles de forma individual o agrupada, midiendo la potencia, intensidad y tensión.
- Además tendremos en cuenta la zona de sombreado cuando las plantas se sitúan una delante y otra detrás.
- Determinaremos los incrementos de temperatura que alcanza el panel a distintas potencias (25%, 50%, 75%, 100%).
- También se ensayará el comportamiento de la planta a distintas potencias y cambiando las distancias respecto al panel.
- Analizaremos el consumo de energía en función de las temperaturas alcanzadas entre las zonas de máxima y mínima irradiación.
- Por último, se analizarán los datos empleando distintos programas de análisis.



### **3. ANTECEDENTES**



### 3.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA.

---

En la actualidad, en todo el mundo, se están discutiendo estrategias para cambiar el perfil del consumo energético, que se presenta basado en energías de origen fósil y donde mayor demanda existe es en los países desarrollados.

Coexisten varios factores de tipo social, político, económico y técnico que cambian el estilo del consumo eléctrico, sea por la incorporación cada vez más amplia de los electrodomésticos, por cambios de nuevas tecnologías que modifican las formas de generación y abastecimiento de energía (Raposo, 2004). Las políticas de ahorro y eficiencia energética se configuran como un instrumento de progreso de la Sociedad, pues: contribuyen al bienestar social; representan un elemento de responsabilidad social; proyectan las actividades humanas hacia el desarrollo sostenible; establecen un nuevo marco para el desarrollo de la competitividad empresarial; y, en suma, responden al principio de solidaridad entre los ciudadanos y los pueblos.

Europa y Estados Unidos, por su condición de grandes consumidores mundiales, son los principales interesados en estrategias para reducir su dependencia y su factura energética. Mediante políticas basadas en fomentar las fuentes de suministro autóctonas, apoyar la eficiencia energética además de apostar por la inversión en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías.

Los Estados miembros de la Unión Europea han diseñado políticas, la Directiva 2006/32/EC, sobre eficiencia en el uso final de la energía y los servicios energéticos, define un marco de esfuerzo común para conseguir un ahorro de un 9% en el año 2016. El presente PAE4+ se integrará en el Plan de Acción de Eficiencia Energética a nivel comunitario, contribuyendo con ello a dar repuesta a España, no sólo a la consecución de este compromiso, sino también a un objetivo mucho más ambicioso, incluido en la decisión del Consejo europeo de 9.3.2007 de alcanzar niveles de ahorro del 20 % sobre los tendenciales en el horizonte del 2020. (IDAE, 2007).

También ha contribuido el cambio a las circunstancias respecto de crisis anteriores, como el aumento del precio del petróleo en los años 70, que desencadenó una grave crisis a nivel mundial. Hoy día el resultado está siendo una ralentización del crecimiento.

En España el panorama energético nos indica que tiene un grado de dependencia energética superior al 80%. Por ello, es probable que el impacto económico sea mayor que en los países del entorno, principalmente por la existencia de tres rasgos diferenciadores respecto de los parámetros europeos:



a) Un elevado peso del petróleo en la economía española, concretamente un 51 por cien en el abastecimiento de energía primaria en 2004, frente al 40 por 100 que supone en el conjunto de la Unión Europea. A ello se une el menor peso relativo del gas natural, que en España supone un 17% del consumo frente al 24% en el conjunto de la Unión Europea.

b) La elevada dependencia de las importaciones para satisfacer la demanda española de energía pone en evidencia otra de las características de nuestro patrón energético: su vulnerabilidad. El grado de autoabastecimiento medio en la UE, más del 50 por 100, es muy superior al español, lo que viene explicado por la presencia de yacimientos de crudo y gas natural en algunas regiones de Europa.

c) El tercer rasgo que define el modelo energético español es la elevada intensidad energética de la producción, lo que significa un alto consumo de energía por unidad de PIB. Desde el año 2000 la intensidad energética en España crece a una tasa media anual del 0,7 por 100, mientras que en la UE el indicador se reduce a un ritmo del medio del 0,8 por 100 anual.

La tendencia creciente de la intensidad energética en España obedece a un fuerte aumento de la demanda de energía en los sectores de transporte y usos domésticos. Dicho crecimiento se deriva del intenso proceso de convergencia en renta per cápita de los últimos años. Dos indicadores que reflejan una mejora de la calidad de vida.

Ante este panorama, al que se unen otras restricciones, especialmente la derivada de las exigencias medioambientales, se defiende la necesidad de impulsar un cambio en el modelo energético. La clave para ello es garantizar el funcionamiento adecuado de los mecanismos del mercado competitivo, muy especialmente, del mercado único europeo. Esto significa que las variaciones en los costes por el encarecimiento o abaratamiento de las materias primas, por lo tanto de la energía, deben transmitirse a los precios finales, enviando así las señales adecuadas que incentiven un cambio en las pautas de consumo de los agentes económicos hacia un modelo más eficiente desde el punto de vista energético.



### **3.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ESPAÑA.**

---

El Ministerio de Industria, Turismo y Comercio ha elaborado un nuevo Plan de Acción, para el periodo 2008-2012, dentro de las estrategias de Ahorro y Eficiencia Energética en España.

Los principios rectores deben traducirse en planificaciones, como la que aquí se presenta, cuyos focos deben dirigirse hacia lograr los siguientes objetivos estratégicos:

1. Reconocer en el ahorro y la eficiencia energética un instrumento del crecimiento económico y del bienestar social.
2. Conformar las condiciones adecuadas para que se extienda y se desarrolle, en la Sociedad, el conocimiento sobre el ahorro y la eficiencia energética.
3. Impregnar el ahorro y la eficiencia energética en todas las Estrategias nacionales y especialmente en la Estrategia española de Cambio Climático.
4. Fomentar la competencia en el mercado bajo el principio rector del ahorro y la eficiencia energética.
5. Consolidar la posición de España en la vanguardia del ahorro y la eficiencia energética.

El plan fija como objetivo energético, cuantificado un ahorro de energía primaria de 24.776 ktep en 2012 frente al escenario que sirvió de base para el Plan inicial 2004-2012, lo que supone un 13,7%. Frente al escenario considerado como base por la Directiva 2006/32/EC, sobre eficiencia en el uso final de la energía y los servicios energéticos, el ahorro conseguido sería en 2012 del 11%, superando así el objetivo fijado por dicha Directiva de alcanzar el 9% en 2016. Por otra parte, como consecuencia directa del Plan y en coherencia con la EECCEL (Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia), se estima lograr un volumen de reducción de emisiones de 270.592 ktCO<sub>2</sub> en el periodo 2004-2012, de los cuales 238.130 ktCO<sub>2</sub> se logrará en el periodo del plan 2008-2012.

Determinar nuevas técnicas o mejorar las existentes para lograr este objetivo es uno de los retos para los profesionales del sector, no sólo por lo mostrado hasta aquí sobre la racionalización del consumo de energía sino también por la fuerte presión que sufren los precios de los productos agrarios. En un mercado globalizado reducir costes de producción es un factor determinante para poder rentabilizar los cultivos.

Todavía, el sector agrario español tiene una fuerte dependencia del consumo de energía si lo comparamos con el mismo sector en el conjunto de la Unión Europea. Los consumos de los distintos sectores productivos, en porcentajes, son los siguientes:



	<b>España</b>	<b>Unión Europea</b>
<b>Industria</b>	31.4	28.5
<b>Transporte</b>	39.4	32.5
<b>Residencial</b>	14.7	25.3
<b>Servicios</b>	8.1	11.4
<b>Agricultores</b>	6.3	2.3

Fuente: EUROSTAT y Ministerio de Economía (Planificación de los sectores de electricidad y gas: Desarrollo de las redes de transporte 2002-2011).

Tabla 1. Porcentaje de consumo de energía de los distintos sectores productivos, comparando España con la Unión Europea.



### **3.3. CONCEPCIÓN DE CULTIVO PROTEGIDO.**

---

La concepción tradicional de una actividad agrícola próspera ligada a circunstancias favorables del suelo, agua y clima, quiebra de forma determinante con la aplicación de diversas innovaciones tecnológicas que permiten el desarrollo de los cultivos bajo protección por lo que mitigan las limitaciones que el medio físico natural impone a la producción agrícola.

El concepto de cultivo protegido se refiere a aquel sobre el que durante todo el ciclo productivo o parte del mismo, se actúa modificando las condiciones del microclima en que se desarrolla la planta, permitiendo la obtención de producciones en tiempos y espacio fuera de lo habitual. Este concepto está estrechamente ligado a una elevada y continua incorporación de las nuevas técnicas que facilitan una rápida adecuación de la producción a la evolución de los mercados, incrementando las producciones, mejorando la calidad de los productos obtenidos y facilitando, de este modo el mantenimiento de la rentabilidad del sistema productivo.



#### **3.4. LOS CULTIVOS EN INVERNADERO EN EL ÁREA MEDITERRÁNEA.**

---

La superficie actual de invernaderos en el mundo supera las 450.000 ha, con un continuo crecimiento en los últimos años, estimándose en un 20% anual desde 1980, destacando con un 66% de esta superficie el área asiática (China, Japón y Corea), seguida de la cuenca mediterránea con un 30% (Cobos y López, 1997).

España es una buena muestra de este rápido desarrollo, que ha tenido lugar en las últimas décadas, situándose a la cabeza de los países mediterráneos y europeos en superficie dedicada a invernaderos (546 ha en 1968 y 46.852ha 1999), siendo superada a escala mundial sólo por China (200.000ha) y Japón (60.000ha) (Cobos y López, 1997).

En Europa, tras España, se sitúan Italia con 27.731 ha, Turquía con 14.000 ha y Francia con 9.200 ha. En el área mediterránea, el país no europeo con mayor superficie de invernaderos es Marruecos con unas 10.000 ha y en un continuo aumento.

En Europa, este desarrollo se localiza en los países mediterráneos, fundamentalmente en las comarcas costeras, donde las buenas condiciones de insolación, las suaves temperaturas invernales y la estabilidad del clima deriva de la proximidad del mar (Castilla, 2005) determinan unas condiciones muy favorables para los cultivos protegidos. Esto explica la rápida expansión de esta agricultura en el conjunto de la región mediterránea donde, en la actualidad, se localiza una de las mayores concentraciones de cultivos protegidos del mundo, con más de 400.000 ha, de las cuales, una 130.000 ha son invernaderos.





Fuente: P.Campra - Debat.cat /Ecoalimenta.com

Figura 1. Imagen del “mar de plástico” de Almería.



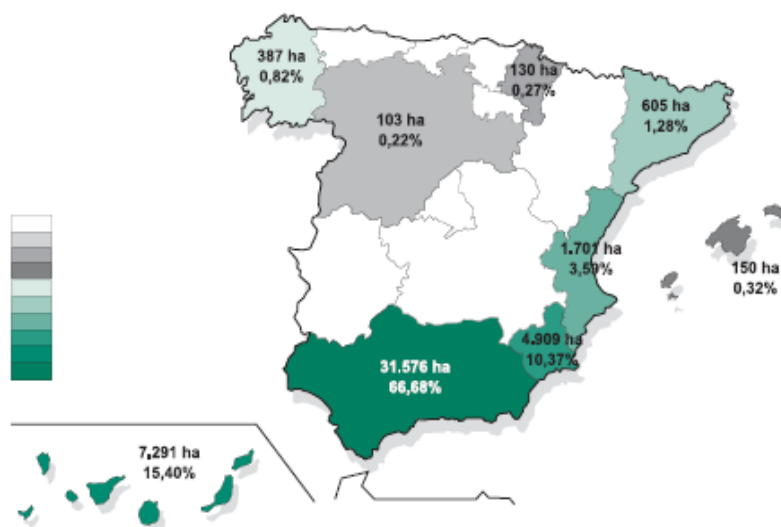
Fuente: La agricultura mediterránea en el siglo XXI.

Figura 2. Superficie de invernaderos por países en la cuenca mediterránea.

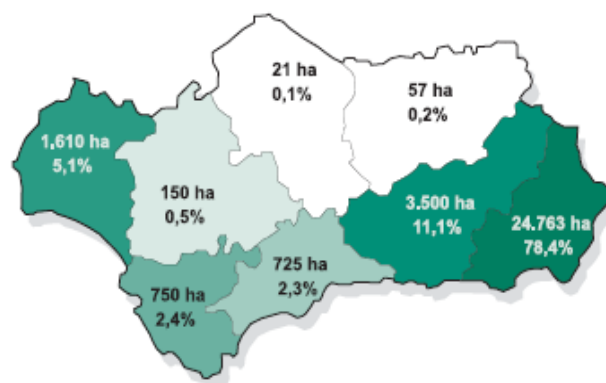
La distribución de la superficie de invernaderos en España (Figura 3) presenta una gran concentración en el Sureste peninsular, destacando Andalucía y Murcia con un 66,78% y 10,37% de la superficie, respectivamente. El ejemplo más llamativo de esta alta concentración es Almería con 24.763 ha, que suponen el 52,9 % de la superficie de invernaderos de España.

La Figura 4, refleja la rápida expansión de los cultivos en España y Almería, en las últimas décadas.

La superficie ocupada por invernaderos, se dedica principalmente al cultivo de hortalizas, entre las que destacan los cultivos de tomate, pimiento, judía, melón, sandía, berenjena, calabacín y pepino, siendo muy pequeño la superficie dedicada a flor, planta ornamental y otros cultivos.

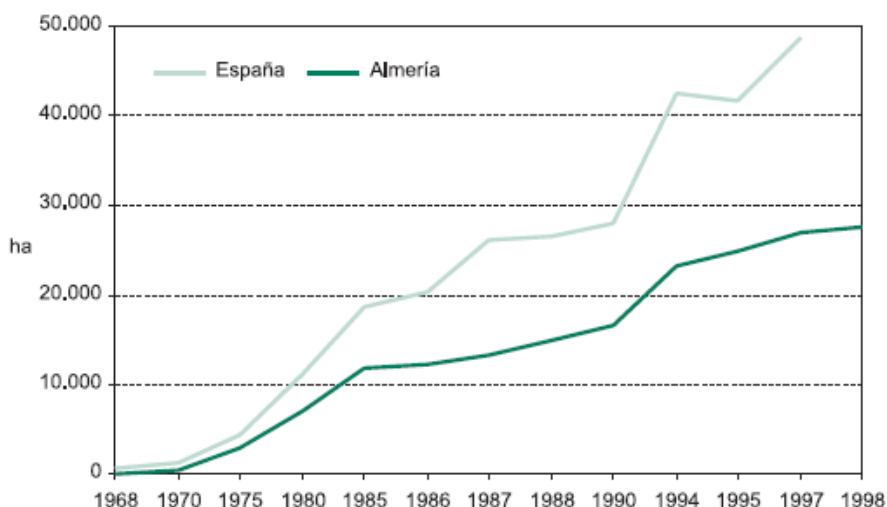


Fuente: Estimaciones finales de campaña 1998/99. Servicio de Estadísticas Agrarias del MAPA



Fuente: Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía

Figura 3. Distribución de la superficie de invernaderos en España Campaña 1998/99.



Fuente: Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía

Figura 4. Evolución de la superficie ocupada por invernaderos.

Las 46.852 ha de invernaderos, suponen el 0,25% de la superficie total cultivada de España y el 1,5% de la superficie de regadío, pero el valor económico de las producciones obtenidas en ellos contribuye con un 15% a la Producción Final Agraria (PFA) española, lo que expresa su alta rentabilidad respecto de otros sistemas productivos.

Asimismo, los casi 100.000 empleos directos que generan y en torno a 25.000 empleos indirectos en industrias y servicios vinculados indican el interés social de subsector de cultivos en invernaderos en España.



### **3.5. CONTEXTO DE LA PRODUCCIÓN BAJO INVERNADERO.**

---

Una característica importante de la producción agraria es que, generalmente se realiza en zonas alejadas de los núcleos de consumo. En esta situación y para productos de consumo fresco, su carácter perecedero y los costes de transporte desde las áreas de producción justifican los intentos de aproximar los centros productivos a los de consumo. Esta alternativa y el poder alargar los periodos de oferta de los productos en el mercado, requieren frecuentemente cultivar en condiciones desfavorables para las plantas, lo cual exigirá protegerlas dentro de ambientes más adecuados para su desarrollo, con unos costes de operación compatibles con el rendimiento económico de la producción. En este marco se encuadra el cultivo bajo invernadero.

El invernadero es un sistema aislado del ambiente exterior pero muy sensible al mismo. El control del invernadero debe, a corto plazo, tener presente esta sensibilidad y disminuir la influencia del clima exterior, fundamentalmente de la radiación solar, creando un ambiente óptimo para el desarrollo del cultivo. A largo plazo, el manejo del invernadero deberá tener en cuenta el comportamiento vegetal con el objetivo de una producción comercialmente competitiva y de calidad.

La función de un invernadero es propiciar un ambiente en el que las plantas puedan crecer bajo una relación coste/rendimiento efectiva. Es decir, dar protección de los efectos adversos del viento y de las precipitaciones además de establecer temperaturas diurnas superiores a las del ambiente exterior, por el efecto de la radiación solar absorbida por el invernadero. Sin embargo, por las noches y durante el invierno, las temperaturas que se producen naturalmente en el invernadero son ligeramente superiores a las del ambiente exterior y las plantas presentan menores rendimientos. En determinadas condiciones es necesario disponer de calefacción artificial para evitar descensos térmicos por debajo de un cierto límite, que pueda dañar a la planta. Este beneficioso comportamiento del invernadero se convierte en perjudicial durante el periodo estival, en el que será necesario disponer de algún sistema de refrigeración que permita disipar el calor acumulado en el interior.

El clima generado en los invernaderos tradicionales, sin calefacción, en España está lejos del óptimo biológico de las especies que se cultivan en su interior, durante la mayor parte de los ciclos productivos (Minguez, 1998).

La mayoría de los invernaderos empleados son de bajo coste, sin casi uso de energía, por lo que no generan condiciones de microclima óptimas para la gran parte de las especies cultivadas (Castilla, 1995). A diferencia de los países del norte de Europa donde la opción tecnológica ha sido la de optimizar el microclima a fin de propiciar el ambiente más adecuado posible para obtener el máximo biológico de



cada especie y en consecuencia aumentar la calidad de producto y regularizar la producción, en los países de clima mediterráneo, al tener condiciones climáticas más suaves y un alto número de horas de sol, se decidió por adaptar las plantas a las condiciones locales (Hernández & Castilla, 1999).

La ausencia de equipos de control climático en la mayoría de los invernaderos en España provoca valores extremos indeseables de temperaturas máximas en primavera y verano y mínimas críticas en invierno. Las variaciones climáticas hacen suponer que el nivel óptimo de los factores climáticos varía dentro del día, aparte de entre días por lo que la optimización climática debe ser dinámica, es decir, que permita maximizar continuamente la diferencia entre la tasa de producción, la tasa de consumo energético y demás insumos, para lo que es necesario ajustar los puntos de control en función del resultado económico, lo que hace que este control sea extremadamente complicado.

La necesidad de mejorar las condiciones de producción es el sentido de acercar la productividad en los países mediterráneos a la conseguida en los países del norte de Europa; lógicamente este objetivo debe ser logrado sin incrementar drásticamente las inversiones y los gastos de cultivo, con el fin de mantener una situación competitiva en el ámbito del mercado internacional en un futuro no muy lejano.

Para realizar la elección de un determinado tipo de invernadero en una zona concreta hay que considerar, en primer lugar, las especies vegetales a cultivar, sean hortícolas u ornamentales. Una vez realizada la elección, el cultivo va a determinar las condiciones climáticas necesarias y, por tanto, el tipo de invernadero y el equipamiento a escoger. De forma general se puede elegir entre invernaderos fríos, sin requerimientos de calefacción, sin grandes exigencias de aislamiento y con pocas posibilidades de control del clima interior; e invernaderos calientes, con equipamiento de calefacción y mayores posibilidades de control de las condiciones ambientales.

La incorporación de sistemas de calefacción permite unos niveles térmicos adecuados durante la época invernal, que han propiciado en experimentos de producción del orden del 86% y 30% respectivamente con respecto a parcelas sin ningún tipo de sistema de calefacción.

Hernández & Castilla (2000) indican que es necesario generar información para la gestión del clima, en función del paquete tecnológico disponible y de las condiciones concretas del cultivo.



### **3.6. AHORRO ENERGÉTICO EN LA CALEFACCIÓN.**

---

Las técnicas de acondicionamiento climático en invernaderos suelen estar asociadas a alguna estrategia de ahorro de energía, de manera que se pueda minimizar el impacto del consumo de combustible sobre la rentabilidad del cultivo, al tiempo que mantiene el cultivo en condiciones óptimas.

La producción en invernadero permite cultivar en condiciones climáticas favorables para las plantas. Para ello, los invernaderos están equipados con tecnologías cada vez más sofisticadas de calefacción y refrigeración. Sin embargo, suele ocurrir que estos equipos no consigan los valores óptimos de clima para una buena productividad y calidad, a pesar de que estas condiciones óptimas suelen ser teóricamente conocidas. El problema, en ocasiones, consiste en decidir cómo utilizar estos equipos, es decir, como controlar su encendido y apagado para conseguir un clima óptimo en el interior del invernadero, siendo si es posible, un gasto mínimo de agua y energía.

El valor de referencia en calefacción es la temperatura del aire que se quiere obtener en cada momento, valor que se denomina temperatura de consigna. En los invernaderos holandeses se ha utilizado tradicionalmente una temperatura de consigna nocturna y otra diurna; la diurna suele estar a unos 5°C por encima de la nocturna. En la actualidad, los holandeses llegan a utilizar hasta 8 consignas al día, en los diferentes momentos. Una tendencia moderna es aumentar la consigna de forma automática durante el día, en función de la luz, para incrementar la fotosíntesis al aumentar a la vez la radiación y la temperatura (Benavente et al., 2001).

Según estos mismos autores, en zonas mediterráneas lo habitual es utilizar una única consigna nocturna, que es el valor de la temperatura por debajo de la cual no se desea descender. Durante el día, la radiación solar suele ser suficiente para alcanzar niveles de temperatura adecuados.





### **3.7. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LOS CULTIVOS.**

---

La temperatura es un factor determinante para: la actividad metabólica, el crecimiento y el desarrollo de los vegetales.

La distribución biogeográfica de las especies que se cultivan en el sudeste español, protegidas bajo invernadero de plástico, (tomate, pimiento, pepino, melón, sandía, judía, calabacín y berenjena) tiene lugar en latitudes subtropicales, generalmente asociadas a regímenes térmicos menos variables y temperaturas mínimas más elevadas, superiores a 12°C, límite considerado como el mínimo por debajo del cual estas especies ralentizan el crecimiento y presentan síntomas de deterioro. Estas consideraciones ponen en evidencia que en ausencia de control climático los cultivos, únicamente protegidos por una cubierta de plástico, se desarrollan a merced de la climatología local, produciéndose acumulaciones productivas y amplias variaciones en la cantidad y calidad de las cosechas. Al mismo tiempo los cambios de la actividad metabólica, a veces bruscos, propiciados por la evolución medioambiental inducen un envejecimiento precoz de las plantas y reducen su potencial productivo.

En invierno la temperatura media de las mínimas se sitúa entre 7 y 9 °C (Montero, 1985) con oscilaciones variables entre las diferentes campañas. Conviene añadir que en los invernaderos pasivos con frecuencia se producen inversión térmica, especialmente ocurre en las noches de cielo despejado, cuando la turbulencia del aire en el interior de las estructuras es prácticamente nula. Estos valores están en el límite superior del rango que origina un daño fisiológico (0-10°C) considerable en estas especies hortícolas (Tognoni, 1990). (Verlot, 1990) establece el umbral de las temperaturas mínimas nocturnas entre 15 y 18,5 °C, por debajo de las que se necesitaría incorporación de calor para un adecuado crecimiento y desarrollo de los cultivos antes mencionados. (López J.C., P. Lorenzo, Medrano E., Sánchez- Guerrero M.C., Pérez J., Puerto H.M. y Arco M., 2000).

Por otra parte, la temperatura de la planta, del aire y del sistema radicular (situado en un medio diferente al aire, generalmente: suelo, sustrato, agua) presentan amplias variaciones debidas a:

- Ciclos diarios (variación regular).
- Ciclos estacional (variación regular).
- Nubosidad (variación irregular a corto plazo).
- Posición de las hojas en el dosel vegetal (hojas de sol o de sombra).
- Altura del nivel foliar respecto de la superficie del suelo.





#### -Dimensión foliar.

La temperatura de la raíz de las plantas cultivadas en el suelo depende principalmente de las variaciones diarias, estacionales y de la profundidad en la que se sitúa respecto de la superficie del suelo.

Las temperaturas inferiores al rango óptimo originan estrés térmico sobre la planta e inciden sobre: los procesos metabólicos, la producción de materia seca y por tanto afectan a la productividad de los cultivos.

La duración temporal y la intensidad del estrés térmico marcan la posibilidad de restablecer la actividad metabólica al nivel inicial, después de volver a unas condiciones más favorables, en unos casos puede producirse una recuperación parcial, en otros se pierde definitivamente esta opción.

Las especies termófilas, entre las que podemos considerar la mayoría de las hortalizas que se cultivan bajo protección en el litoral mediterráneo y las plantas ornamentales, cuando la temperatura desciende por debajo de los 10-12°C presentan las siguientes alteraciones:

- Reducción del crecimiento, especialmente de la elongación, de la expansión foliar y en consecuencia de la radiación absorbida por el cultivo.
- Disminución de la tasa de asimilación neta.
- Depresión de la respiración.
- Reducción del transporte y distribución de asimilados.
- Disminución de la absorción de agua y sales minerales debido a: aumento de la viscosidad del agua, aumento de la resistencia del tejido de la planta por la disminución de permeabilidad de la membrana celular, reducción de la absorción y acumulación activa de iones y disminución del crecimiento de la raíz.
- Cambios anatómicos y morfológicos: tendencia a desarrollar hojas más anchas y cortas, reducción de la longitud del peciolo, aumento del grosor de la hoja y disminución del área foliar específica.
- Pérdida de la fertilidad.
- Envejecimiento precoz del tejido fotosintético por necrosis celular.

El aporte de calor en el interior del invernadero mediante sistemas de calefacción permite el control de la temperatura durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos, por tanto posibilita programar la producción del fruto.



Una de las mejores vías de mejora en el sector agrícola almeriense es sin duda la mejora climática y su automatización.

Los beneficios potenciales que resultan del uso de calefacción en la horticultura protegida son archiconocidos, el problema deriva en el coste energético de estos sistemas para el control activo del clima. Por ello se hace imprescindible aumentar la eficiencia energética de estos dispositivos, con la idea de intentar acrecentar la rentabilidad.

El ahorro energético es un tema de actualidad en todos los campos productivos, entre ellos en el cultivo intensivo de productos hortícolas y ornamentales bajo invernadero.

El objetivo principal de las técnicas orientadas a una mejor eficiencia de los equipos de calefacción es obtener la temperatura óptima para el cultivo con un mínimo de consumo de energía; eso se consigue gracias a la capacidad de transformar mejor el poder calorífico de los combustibles en calor en el interior del invernadero, o por una adecuada orientación o ubicación del equipo calefactor.

Para aumentar la eficiencia energética de la producción en invernadero podemos encontrar diversas técnicas, las cuales van a mejorar la competitividad de las explotaciones incrementando un ahorro energético. De las cuales podemos destacar tres conceptos, de acuerdo con su actuación:

- Técnicas orientadas a la mejora del diseño del invernadero de la eficiencia de transmisión del calor de los equipos calefactores.
- Técnicas que actúan sobre estrategias del control climático del invernadero, y
- Técnicas que buscan la utilización de fuentes renovables de energía.

Las técnicas que definen estrategias de control climático en invernaderos buscan obtener una relación óptima entre el aporte energético dado al cultivo y la producción esperada. El control de las variables climáticas de un invernadero va buscando que el margen económico entre el valor del cultivo producido bajo la influencia del clima y el coste ocasionado por el control sea el máximo posible.

La calefacción constituye un medio efectivo para evitar la pérdida de calor durante periodos fríos. En invierno, la temperatura del aire durante el día es aceptable, pero durante la noche baja en exceso mientras que la humedad del aire es demasiado elevada (Castilla, 2005).



Para analizar el uso de los sistemas de calefacción, se requiere un amplio conocimiento de sus características. Hay autores que trabajan en la necesidad del ahorro y rentabilidad de las explotaciones, mediante el uso de técnicas de ahorro energético y la utilización de energías renovables (Bourlard et al., 1989; González y Martínez, 1981; Matallana y Montero, 2001; Matallana, 1984; Plaisier, 1991; Valera, 1999). En la horticultura el coste de la calefacción incide entre un 10% a un 30% de los gastos de la explotación. Esta amplia variación porcentual es consecuencia de la variedad de especies cultivadas en horticultura (comestible y ornamental).

Tanto los sistemas de calefacción como las técnicas de ahorro energético repercutirán en la producción de productos de calidad, hecho fundamental si se desea entrar en los mercados actuales y abrir otros nuevos. Dada la gran competencia existente en el mercado de los productos hortícolas en ciertas épocas del año, la mejora del control ambiental en los invernaderos puede permitir una mayor flexibilidad de los calendarios de producción de forma que se adapten a los períodos de mejores ventas (Valera, 1999).

El análisis del coste de la energía es tema de máxima preocupación cuando se estudia su incidencia en cada explotación individual. Ya que puede suponer el coste energético entre un 10 y 40% de las cuantías totales de producción en un invernadero con calefacción, según Bailey y Ellis (1989).



### 3.8. BALANCE DE RADIACIÓN EN EL INVERNADERO.

La radiación térmica implica la transferencia de calor de un cuerpo a otro de más baja temperatura mediante ondas electromagnéticas a través del medio que las separa. Las ondas en la radiación térmica tienen propiedades similares a otros tipos de ondas electromagnéticas, difiriendo únicamente en su longitud de onda.

Parte de la radiación que incide sobre un cuerpo  $I_\lambda$ , para una longitud de onda  $\lambda$ , es reflejada  $I_{r\lambda}$ , parte es absorbida  $I_{a\lambda}$ , y parte es transmitida  $I_{t\lambda}$ . Se define la reflectividad por  $\delta_\lambda = I_{r\lambda}/I_\lambda$ , la absorbididad por  $\alpha_\lambda = I_{a\lambda}/I_\lambda$  y la transmisividad por  $\tau_\lambda = I_{t\lambda}/I_\lambda$ , siendo la radiación incidente igual a:

$$I_\lambda = \alpha_\lambda \cdot I_\lambda + \delta_\lambda \cdot I_\lambda + \tau_\lambda \cdot I_\lambda$$

Por tanto para toda longitud de onda se cumplirá:

$$\alpha_\lambda + \delta_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Así, una parte de la energía solar que llega a la cubierta del invernadero es reflejada, otra parte es absorbida por el material de la cubierta, aumentando así su temperatura, y el resto es transmitida hacia el interior del invernadero.

De esta última parte se absorberá una cierta cantidad y el resto se perderá por reflexión o transmisión hacia el exterior del invernadero.

La cubierta del invernadero también perderá parte de la energía absorbida en forma de radiación.

La ley de Stefan-Boltzman establece que para un cuerpo negro, la energía emitida,  $E_0$ , es igual a:

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 [W/m^2]$$

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ ).

$T$ : temperatura absoluta del cuerpo emisor [K].

La ley del desplazamiento de Wien establece que la longitud de onda a la que tiene lugar el máximo de emisión viene dada por la expresión:

$$\lambda_{max} = 2897/T \quad [\mu m]$$

De acuerdo con esta ecuación para una temperatura de 0 a 30°C,  $\lambda_{max}$  toma valores entre 9,6 y 10,6  $\mu m$  (9600-10600 nm), es decir, en el infrarrojo lejano conocida como radiación térmica o calorífica. Así los materiales de cobertura, las plantas y el suelo emiten la mayor parte de la energía radiante entre los 5000 y 35000 nm.

Se define la emisividad de un cuerpo ( $\varepsilon_\lambda$ ) como el cociente entre la energía total emitida y la energía total que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura. Es decir:

$$\varepsilon_\lambda = E_\lambda(T)/E_{0\lambda}(T)$$

siendo  $E_{0\lambda}(T)$  la energía emitida por el cuerpo negro para una longitud de onda  $\lambda$ .

La **ley de Kirchhoff** establece que la emisividad,  $\varepsilon_\lambda$ , de una superficie es igual a la absorbividad de la misma para una misma longitud de onda  $\lambda$ :

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

Por otra parte, la ley de Kirchhoff muestra que la energía emitida por cualquier cuerpo debe ser inferior a la de un cuerpo negro a la misma temperatura. Es decir, la emisividad de una superficie real debe ser inferior a la unidad ( $\varepsilon_\lambda < 1$ ).

Para el cálculo del balance radiactivo a nivel del invernadero, se ha considerado que la radiación neta que calienta el invernadero es igual a la energía absorbida por la cubierta, por el suelo y las plantas menos la radiación emitida por la cubierta:

$$R_n = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{I_\lambda \cdot [1 - \delta_\lambda - \tau_\lambda \cdot (1 - \alpha_{s\lambda})] - \varepsilon_\lambda \cdot E_{0\lambda}\} \cdot d\lambda$$

Donde;

$\lambda_1, \lambda_2$ : longitudes de onda entre las que se encuentra la radiación.

$I_\lambda$ : radiación solar incidente para una longitud de onda  $\lambda$ .

$\delta_\lambda$ : reflectividad de la cubierta del invernadero para una longitud de onda  $\lambda$ .

$\tau_\lambda$ : transmisividad de la cubierta del invernadero para una longitud de onda  $\lambda$ .

$\alpha_{s\lambda}$ : absorptividad de las plantas y del suelo para una longitud de onda  $\lambda$ .



$\varepsilon_\lambda$ : emisividad de la cubierta del invernadero para la longitud de onda  $\lambda$ .

$E_{0\lambda}$ : energía total emitida por un cuerpo negro a la temperatura de la cubierta para una longitud de onda  $\lambda$ .

Considerando los valores globales dentro de cada uno de los rangos de longitudes de onda tenemos:

$$R_n = S_s \cdot [I \cdot (\alpha + \tau \cdot \alpha_s)] + S_c \cdot \sigma \cdot [\tau_{ter} \cdot T_{atm}^4 - \tau_{ter} \cdot \varepsilon_s \cdot T_s^4 - \varepsilon_{ter} \cdot (T_{ci}^4 - T_{ce}^4)] [W]$$

Donde;

$S_s$ : superficie captadora de la radiación solar [ $m^2$ ].

$I$ : radiación solar incidente [ $W/m^2$ ]

$\alpha$ : coeficiente de absorción del material de cubierta para la radiación solar.

$\tau$ : coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar.

$\tau_{ter}$ : coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación térmica.

$\varepsilon_{ter}$ : emisividad del material de cubierta para la radiación térmica.

$\varepsilon_s$ : emisividad del conjunto de plantas y suelo para la radiación térmica.

$T_{atm}$ : temperatura aparente de emisión de la atmósfera [ $K$ ].

$T_{ce}, T_{ci}$ : temperatura de la cubierta del invernadero en la cara interna y externa [ $K$ ].

$T_s$ : temperatura de las plantas y del suelo [ $K$ ].



### 3.9. BALANCE ENERGÉTICO EN UN INVERNADERO.

---

A continuación se presentan las diferentes expresiones matemáticas que permiten evaluar la energía calorífica que se introduce o se pierde en un invernadero. Así como los parámetros y variables que intervienen en su cálculo.

El balance energético viene definido por la siguiente expresión:

$$R_n + Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} \quad (W)$$



Energía ganada

Energía perdida

por el aire del invernadero

Donde:

$R_n$ : Radiación neta.

$Q_{cli}$ : Energía calorífica que es necesario aportar ( $Q_{cal}$ ) o eliminar ( $Q_{ref}$ ) del invernadero.

$Q_{cc}$ : Calor perdido por conducción- convección.

$Q_{ren}$ : Calor sensible y latente perdido por la renovación del aire interior.

$Q_{evp}$ : Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo.

$Q_{sue}$ : Flujo de calor perdido por conducción a través del suelo.

## Balance energético en un invernadero

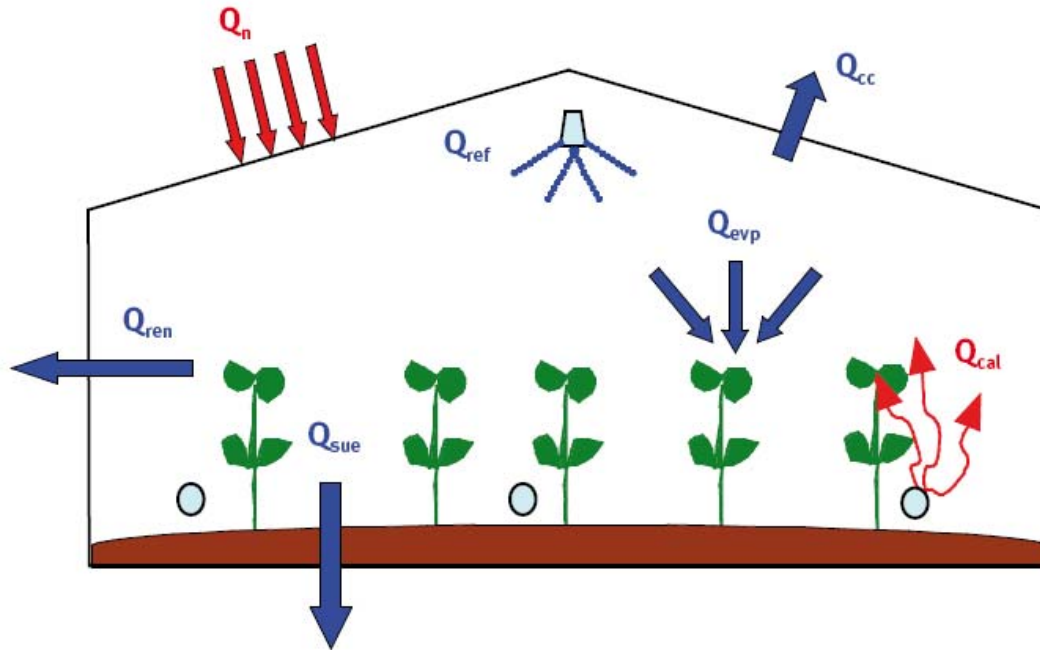


Figura 5. Balance energético en un invernadero.

### Radiación neta, $R_n$

$$R_n = S_s \cdot [I \cdot (\alpha + \tau \cdot \alpha_s)] + S_c \cdot \sigma \cdot \tau_{ter} \cdot [\varepsilon_{atm} \cdot T_{atm}^4 - \varepsilon_{ter} \cdot T_c^4] \quad (W)$$

Donde:

$S_s$ : superficie captadora de la radiación solar ( $m^2$ )

$I$ : radiación solar incidente ( $W/m^2$ )

$\alpha$ : coeficiente de absorción de la cubierta para la radiación solar

$\tau$ : coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar





$S_c$ : superficie de suelo cubierta ( $m^2$ )

$\sigma$ : constante de Stefan- Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ )

$\tau_{ter}$ : coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación térmica

$\varepsilon_{ter}$ : emisividad del material de cubierta para la radiación térmica

$T_c$ : temperatura absoluta de la cubierta (K)

– Coeficiente de absorción de las plantas y del suelo  $\alpha_s$ :

$$\alpha_s = \alpha_{pla} \cdot f_p + \alpha_{sue} \cdot (1 - f_p)$$

$f_p$ : fracción de suelo cubierto por las plantas

$\alpha_{pla}$ : coeficiente de absorción de las plantas para la radiación solar (Tabla 2)

LAI	$\alpha_{pla}(400-2800nm)$	$\alpha_{pla}(2.800-40.000nm)$
2,0	0,65	0,72
2,5	0,71	0,80
3,0	0,75	0,85
3,5	0,78	0,89
4,0	0,81	0,92
4,5	0,82	0,94

Tabla 2. Coeficientes de absorción de una cubierta vegetal para la radiación solar y térmica en función del índice de área foliar. (Stanghellini, 1987)

– Coeficiente de absorción del suelo a la radiación solar,  $\alpha_{sue}$ :

$$\alpha_{sue} = 1 \cdot \rho_{sue}$$

$\rho_{sue}$ : coeficiente de reflexión del suelo a la radiación solar o albedo (Tabla 3)

Tipo de superficie	Albedo $\rho_{sue}$
Arcilla húmeda	0,02-0,08
Arcilla seca	0,16
Arcilla húmeda	0,09
Arcilla seca	0,18
Césped	0,15-0,28
Rastrojo	0,15-0,17
Tela blanca	0,30

Tabla 3. Valores de albedo para diferentes superficies de suelo. (Elias y Castelví, 1996)

– Temperatura de emisión de energía de la atmósfera,  $T_{atm}$  (Swinbank, 1963):

$$T_{atm} = f_n \cdot T_e + 0,0552 \cdot (1 - f_n) \cdot T_e^{1,5} \quad (K)$$

$f_n$ : factor de nubosidad (1 para cielo totalmente cubierto y 0 para cielos claros)

$T_e$ : temperatura absoluta exterior (K)

– Emisividad de la atmósfera,  $\varepsilon_{atm}$  (Baille, 1996):

$$\varepsilon_{atm} = 1 - 0,35e^{\left(\frac{-10e_e[hPa]}{T_e}\right)}$$

– Presión parcial del vapor de agua en el aire en el exterior:

$$e_e = e_{se} \cdot HR_e$$

$HR_e$ : humedad relativa exterior

La presión parcial del vapor saturante en el aire en el exterior se puede calcular mediante la fórmula de Magnus-Tetens, 1930; Murray, 1967):

$$e_s = 6,1078e^{\left[\frac{17,269 t(^{\circ}C)}{t+273,3}\right]} \quad (hPa)$$



# Evaluación de un nuevo panel radiante altamente eficiente como sistema de calefacción para invernaderos

## Antecedentes

Materiales utilizados en cubiertas simples, en dobles paredes o como pantallas térmicas	Espesor (mm)	Radiación solar (300-2.500 nm)			Radiación visible (380-760 nm)			Radiación térmica (2.500-40.000 nm)			U (W/m².°C)	$\rho_c$ (g/cm³)
		( $\alpha = \epsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )	( $\alpha = \epsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )	( $\alpha = \epsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )		
Vidrio hortícola (VH)	4	0,03	0,89	0,08	0,01	0,91	0,08	0,90	0,00	0,10	6,7	2,40
Poliéster (PRV)	1	0,01-0,02	0,89-0,92	0,07-0,09	0,01	0,93	0,06	0,64-0,69	0,27-0,32	0,04		1,50
PVC rígido	18	0,11	0,62	0,27	0,02	0,61	0,37	0,92	0,01	0,07	3,8	1,30
Polimetacrilato de metilo (PMMA)	8	0,06	0,82	0,12	0,01	0,92	0,07	0,98	0,00	0,02	3,4	1,19
Polycarbonato (PC)	4	0,08-0,11	0,78	0,14-0,15	0,06-0,10	0,75-0,79	0,15	0,89-0,98	0,02-0,03	0,09	3,5	0,17-0,20
Polietileno sin aditivos (PE)	0,1	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,04-0,19	0,79-0,84	0,02	9,1	0,92
Polietileno de baja densidad (PEbd)	0,18	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,13-0,40	0,53-0,80	0,07	9,4-16,2	0,91
Polietileno de larga duración (PEld)	0,1	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,20-0,40	0,53-0,76	0,04-0,07	9,4-16,2	0,92
Polietileno infrarrojo (PEir)	0,1	0,03	0,89	0,08	0,01	0,89	0,10	0,77	0,20	0,03	8,6-13,0	0,92
Polietileno térmico (PEt)	0,18	0,03	0,89	0,08	0,02	0,90	0,08	0,80	0,10	0,03	8,6-13,0	0,92
Copolímeros EVA	0,1	0,02	0,89-0,91	0,07-0,09	0,00	0,90-0,92	0,08-0,10	0,42-0,58	0,39-0,55	0,03	7,8	0,94
Coextrusiones PE-EVA-PE	0,2	0,02-0,04	0,82-0,89	0,09-0,14	0,01	0,82-0,85	0,14-0,17	0,59	0,38	0,03	8,8-10,4	0,93
PVC plastificado	0,1	0,02	0,91	0,07	0,01	0,92	0,07	0,62	0,06	0,32	7,7	1,3
PVC armado	0,15	0,06	0,73-0,74	0,20-0,21	0,03	0,73-0,76	0,21-0,25	0,53-0,76	0,09-0,32	0,15	6,5	1,3
Polipropileno (PP)	0,8	0,06	0,74	0,20	0,04	0,73	0,23	0,69-0,71	0,21-0,26	0,05-0,08	11,2	0,91
VH+VH	4+4	0,15	0,72	0,13	0,03	0,82	0,15	0,83	0,00	0,17	3,2	
VH+PE	3,4+0,1	0,04	0,84	0,12	0,01	0,86	0,13	0,87	0,01	0,12	4,2	
VH+EVA	3,4+0,1	0,04	0,84	0,12	0,02	0,86	0,12	0,87	0,01	0,12	4,0	
PE+PE	0,1+0,1	0,03	0,83	0,14	0,00	0,84	0,16	0,28	0,66	0,06	6,8	
PE+EVA	0,1+0,1	0,03	0,87	0,10	0,00	0,88	0,12	0,59-0,70	0,27-0,38	0,03	9,4-10,2	
Pantalla aluminizada en las dos caras	0,04							0,50	0,10	0,40	7,6	
Cara aluminizada hacia el suelo	0,03							0,45	0,23	0,32	7,9	
Cara aluminizada hacia el cielo	0,03							0,50	0,23	0,27	8,1	

Fuentes: Feuilleley et al., 1989 Nisen y Coutisse, 1981  
 Feuilleley et al., 1994 a. Nisen et al., 1984  
 Feuilleley y Issanchou, 1996 Nisen et al., 1984 b.

Tabla 4. Absortividad ( $\alpha$ ), emisividad ( $\epsilon$ ), transmisividad ( $\tau$ ) y reflectividad  $\delta$  para diferentes tipos de radiación; coeficiente de pérdidas de calor ( $U$ ) y densidad ( $\rho_c$ ) de los materiales comúnmente utilizados como cubierta de invernaderos.



**Calor perdido por conducción- convección,  $Q_{cc}$**

$$Q_{cc} = S_d \cdot K_{cc} \cdot (t_i - t_e) \quad (W)$$

$S_d$  : superficie desarrollada de la cubierta del invernadero ( $m^2$ )

$t_i$ : temperatura interior ( $^{\circ}C$ )

$t_e$ : temperatura exterior ( $^{\circ}C$ )

– Coeficiente global de pérdidas de calor por conducción- convección:

$$K_{cc} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_e}} \quad (W/m^2 \cdot ^{\circ}C)$$

$h_i$ : coeficiente superficial de convección para el ambiente interior del invernadero. Para una cubierta simple de polietileno  $h_i = 7,2 \ (W/m^2 \cdot ^{\circ}K)$

$e_c$ : espesor del material de cobertura ( $m$ )

$\lambda_c$ : conductibilidad térmica del material de cobertura ( $W/m^3 \cdot K$ ) (Tabla 5).

$h_e$ : coeficiente superficial de convección para el ambiente exterior del invernadero (Tabla 6).

$\Delta T$ : salto térmico entre el interior y el exterior del invernadero ( $K$ )

$v$ : velocidad del viento ( $m/s$ )

$L$ : longitud de invernadero ( $m$ )



### Conductividad térmica de algunos materiales de cubierta, $\lambda_c$

Material	$\lambda_c (W/m \cdot K)$
Polietileno de baja densidad (PEbd) <sup>a</sup>	0,45
Copolímero del etileno y acetato de vinilo (EVA) <sup>a</sup>	0,45
Polietileno alta densidad (PE) <sup>b</sup>	0,33
Polipropileno (PP) <sup>b</sup>	0,17-0,22
Vidrio celular <sup>b</sup>	0,054-0,067
Polycarbonato ondulado (PC) <sup>c</sup>	0,19
Polimetacrilato (PMMA) <sup>c</sup>	0,19
Policloruro de vinilo (PVC) <sup>d</sup>	0,16
Vidrio <sup>e</sup>	0,76

Fuente: <sup>a</sup> Nijskens et al., 1984c; <sup>b</sup> Mills, 1997; <sup>c</sup> Nijskens et al., 1984c; <sup>d</sup> Stöcker et al., 1999; <sup>e</sup> Chapman, 1984

Tabla 5. Conductividad térmica de algunos materiales de cubierta,  $\lambda_c$ .

### Fórmulas empíricas para el coeficiente de convección exterior determinadas por varios autores.

$h_e (W/m^2 \cdot K)$	Invernadero
$2,8 + 1,2 \cdot v$	Invernadero tipo Venlo <sup>a</sup>
$1,32 \cdot \Delta T^{0,25} \cdot v^{0,8}$	Invernadero tipo túnel <sup>b</sup>
$7,2 + 3,84 \cdot v$	Invernadero de plástico <sup>c</sup>
$5,96 \cdot v^{0,8} \cdot L^{-0,2}$	Invernadero a gran escala <sup>d</sup>
$0,95 + 6,76 \cdot v^{0,49}$	Invernadero con cubierta de polietileno <sup>e</sup>

Fuente: <sup>a</sup> Bot, 1983; <sup>b</sup> Kittas, 1986; <sup>c</sup> Garzoli y Blackwell, 1987; <sup>d</sup> De Halleux, 1989; <sup>e</sup> Papadakis et al., 1992

Tabla 6. Fórmulas empíricas para el coeficiente de convección exterior determinadas por varios autores.

$\Delta T$ : salto térmico entre el interior y el exterior del invernadero (K)

$v$ : velocidad del viento ( $m/s$ )

$L$ : longitud de invernadero (m)



El coeficiente superficial de convección para el ambiente interior del invernadero también se puede calcular en función de la temperatura de la cubierta y del aire:

$h_i = 1,95 \cdot (T_c - T_i)^{0,3} \left( W/m^2 \cdot K \right)$  para  $(T_c - T_i) \leq 11,1^\circ C$  (Para una cubierta simple de polietileno)(Papadakis et al., 1992)

$h_i = 7,2 \left( W/m^2 \cdot K \right)$  para  $(T_c - T_i) > 11,1^\circ C$  (Garzoli y Blackwell, 1987)

### Calor sensible y latente perdido por la renovación del aire interior, $Q_{ren}$

$$Q_{ren} = V_{inv} \cdot R/3600 \cdot \rho \cdot [c_{pa} \cdot (t_i - t_e) + \lambda_0(x_i - x_e) + c_{pv} \cdot (x_i \cdot t_i - x_e \cdot t_e)]$$

Donde:

$V_{inv}$ : volumen del invernadero ( $m^3$ )

$c_{pa}$ : calor específico del aire (a 0 °C es  $1006,92540 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$c_{pv}$ : calor específico del vapor recalentado (a 0 °C es  $1876,6864 J/kg \cdot K$ )

$x_i, x_e$ : humedades absolutas interiores y exteriores, respectivamente  $kg/kg$

– La densidad del aire es función de la temperatura y la presión (Donatelli et al., 2006):

$$P = \frac{1000 \cdot p}{1,01287 \cdot (t + 273,16)}$$

– La presión dentro del invernadero  $p$  se puede considerar igual a la presión atmosférica, que se puede calcular en función de la elevación sobre el nivel del mar (Jensen et al., 1990):

$$P_{atm} = 101,3 \cdot \left[ \frac{293 - 0,0065 \cdot Z}{293} \right]^{5,26}$$

– El calor latente de vaporización se puede calcular (Brooker, 1967):



$$\lambda_0 = 2502535,259 - 2385,76424 \cdot t \quad (J \cdot kg^{-1})$$

- Humedad absoluta de una masa de aire húmedo (ASAE, 1999):

$$x = 0,6219 \cdot HR \cdot e_s / (p \cdot HR \cdot e_s)$$

*HR*: humedad relativa

El cálculo de la presión parcial del vapor en saturación se puede realizar mediante la expresión Magnus o Tetens (Murray, 1967; Dalezios et al., 2002):

$$e_s = 6,1078 e^{\left[ \frac{17,269 t(\square)}{t+237,3} \right]} \quad (hPa)$$

La tasa de renovación de aire *R* debido a la infiltración de aire a través de la estructura cuando las ventanas están cerradas es función del tipo de estructura (Tabla 7).

### Tasas de renovación de aire por infiltración a través de la estructura.

Tipo de cubierta	<i>R</i> ( <i>h</i> <sup>-1</sup> )
<b>Nueva construcción</b>	
Láminas de plástico	0,75-1,0
Vidrio o fibra de vidrio	0,5-1,0
<b>Construcciones antiguas</b>	
Visrio o fibra de vidrio	1-2
Láminas de plástico	2-4

Tabla 7. Tasas de renovación de aire por infiltración a través de la estructura (ASAE, 2003).

Cuando se abren las ventanas la tasa o índice de renovación de aire del invierno se puede calcular a partir de ventilación natural:

$$R = 3600[s \cdot h^{-1}] \cdot \frac{G}{V_{inv}}$$



El flujo de aire que entra y sale del invernadero se debe al efecto combinado de la temperatura y el viento (Boulard et al., 1997):

$$G = C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{h_{12} \cdot \Delta T}{T_e \cdot \left( \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \right)} + \left( \frac{S_1 + S_2}{2} \right)^2 \cdot C_v \cdot V^2} \quad (m^3 \cdot s^{-1})$$

$g$ : aceleración de la gravedad,  $9,807(m/s^2)$

$h_{12}$ : diferencia de altura entre las aperturas de ventilación lateral y cenital ( $m$ )

$S_1$ : superficie afectiva de ventilación lateral ( $m^2$ )

$S_2$ : superficie efectiva de ventilación cenital ( $m^2$ )

$C_v$ : coeficiente adimensional del efecto del viento (Tabla 8)

### Valores del coeficiente de efecto eólico determinados por algunos autores.

$C_v$	Superficie del invernadero, $S_c$ ( $m^2$ )
0,10 <sup>a</sup>	416 ( 2 módulos)
0,14 <sup>b</sup>	179 (1 módulo)
0,071 <sup>c</sup>	900 (túnel)
0,13 <sup>d</sup>	416 (2 módulos)
0,09 <sup>e</sup>	204 (4 módulos)
0,11 <sup>f</sup>	38.700 (60 módulos)

Fuente: <sup>a</sup> Boulard y Baille, 1995; <sup>b</sup> Kittas et al., 1995; <sup>c</sup> Kittas et al., 1996; <sup>d</sup> Papadakis et al., <sup>e</sup> Batista et al., 1999; <sup>f</sup> Bailey, 2000

Tabla 8. Valores del coeficiente de efecto eólico determinados por algunos autores.

– Coeficiente de caída de presión a través de una ventana,  $C_d$  (Tabla 9):

$$C_d = F^{-1/2}$$



- Coeficiente adimensional de pérdida de carga a través de una ventana con malla anti-insectos en invernaderos Almería,  $F$ :

$$F = -0,0012 \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^2 + 0,0396 \cdot \left(\frac{L}{H}\right) + 2,3047 + 1540 \cdot \alpha^{-1,65} + \exp(5,23 - 7,70 \cdot \varphi)$$

$L$ : longitud de la apertura de ventilación (m)

$H$ : altura de la apertura de ventilación o profundidad característica (m)

$\alpha$ : ángulo de apertura de una ventana con alerón ( $^{\circ}$ )

$\varphi$ : porosidad de la malla anti-insectos

**Valores del coeficiente adimensional de caída de presión determinados por algunos autores.**

$C_d$	Tipo de ventana
0,6-0,8	V. rectangular vertical <sup>a</sup>
0,6-0,7	V. cenitales de invernadero <sup>b</sup>
0,6	Ventana rectangular <sup>c</sup>
$0,64 + 0,001 \cdot \alpha$	V. cenitales de invernadero <sup>d</sup>
$\left\{ 1,75 + 0,7 \cdot \exp\left(\left(\frac{L}{(32 \cdot H \cdot \text{sen}\alpha)}\right)^{-0,5}\right) \right\}$	V. cenitales de invernadero <sup>d</sup>
0,63	V. rectangular vertical <sup>e</sup>
0,6-0,7	V. rectangular vertical <sup>f</sup>
0,73	V. rectangular vertical <sup>g</sup>
0,61	V. rectangular vertical <sup>h</sup>
0,74	V. rectangular vertical <sup>i</sup>
$\left\{ 1,9 + 0,7 \cdot \exp\left(\left(\frac{L}{(32,5 \cdot H \cdot \text{sen}\alpha)}\right)^{-0,5}\right) \right\}$	V. cenital de invernadero <sup>i</sup>
$-0,198 + 0,157 \cdot \ln\alpha + 0,00108 \cdot \frac{L}{H}$	V. alargadas ( $L/H \geq 5$ ) <sup>j</sup>

Fuentes: <sup>a</sup> Brown y Solvason, 1963; <sup>b</sup> Kozai et al., 1980; <sup>c</sup> Bruce, 1982; <sup>d</sup> Bot, 1983; <sup>e</sup> Hellickson y Walker, 1983; <sup>f</sup> Timmons et al., 1984; <sup>g</sup> Kirkpatrick y Hill, 1988; <sup>h</sup> Zhang et al., 1989; <sup>i</sup> de Jong, 1990; Bailey et al., 2003

Tabla 9. Valores del coeficiente adimensional de caída de presión determinados por algunos autores.



### Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo, $Q_{evp}$

Para un cultivo de gerbera en invernadero se puede utilizar la siguiente expresión (Margà et al. 2000):

$$Q_{evp} = S_c \cdot (0,3 \cdot R_{sol} + 38,54 \cdot DPV_i + 15,58) \quad (W)$$

$R_{sol}$ : Radiación solar diurna ( $W \cdot m^{-2}$ ) se corresponde con los valores positivos de  $R_n$ )

Déficit de presión de vapor en el interior del invernadero,  $DPV_i$ :

$$DPV_i = e_s(t_i) - e_i \quad (KPa)$$

### Flujo de calor perdido por conducción a través del suelo, $Q_{sue}$

$$Q_{sue} = K_s \cdot S_c \cdot (t_i - t_s) / p \quad (W)$$

$K_s$ : coeficiente de intercambio térmico a través del suelo ( $\frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C$ ) (Tabla 10)

$t_s$ : temperatura del suelo del invernadero ( $^\circ C$ )

$t_i$ : temperatura interior del invernadero ( $^\circ C$ )

P: profundidad a la que estima la diferencia de temperatura ( $m$ )



**Conductividad térmica de algunos tipos de suelo,  $K_s$ .**

<b>Material</b>	<b><math>K_s \left( \frac{W}{m} \cdot K \right)</math></b>
Arena de cuarzo <sup>a</sup>	7,7
Arena de río <sup>a</sup>	4,4
Arena de granito <sup>a</sup>	2,7
Grava <sup>b</sup>	2,3-2,8
Tierra húmeda <sup>b</sup>	2,0
Tierra seca <sup>b</sup>	1,0
Lana de roca <sup>c</sup>	0,038-0,048
Cemento <sup>c</sup>	1,16
Hormigón <sup>c</sup>	0,88
Hormigón celular <sup>d</sup>	0,11
Hormigón armado <sup>d</sup>	0,39-1,6
Turba seca <sup>d</sup>	0,08
Arcilla seca <sup>d</sup>	1,0-1,2

Fuente: <sup>a</sup> Côté y Honrad, 2005; <sup>b</sup> Mill, 1997; <sup>c</sup> Chapman, 1984; <sup>d</sup> Stöcker et al., 1999

Tabla 10. Conductividad térmica de algunos tipos de suelo,  $K_s$ .

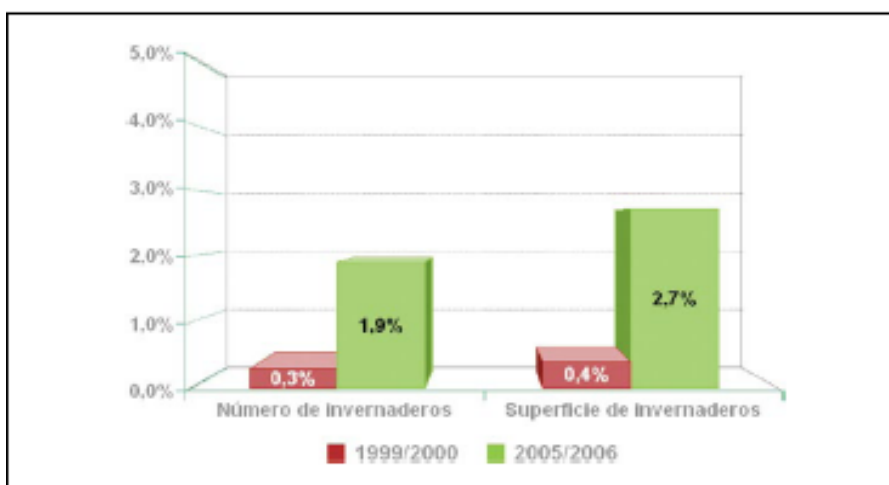
– Energía calorífica necesario aportar ( $Q_{cal}$ ) o eliminar ( $Q_{evp}$ ) del invernadero  $Q_{cli}$

$$Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} - R_n$$

### 3.10. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN.

#### 3.10.1. MÉTODOS DE CALEFACCIÓN UTILIZADOS EN LA PROVINCIA DE ALMERÍA.

Los sistemas de calefacción se utilizan para evitar que las temperaturas durante los meses invernales desciendan a niveles que limiten la producción o la calidad de los cultivos. La zona de distribución de los invernaderos presenta un clima mediterráneo que se caracteriza por tener unos inviernos suaves, motivo por el cual la utilización de estos sistemas tiene una baja implantación, como se recoge en la figura 6. A pesar de su escasa utilización se ha incrementado el uso de estos dispositivos en relación a la campaña 1999/2000. (Pérez- Parra et al., 2006)



Fuente: Tecnología de los invernaderos mediterráneos: evolución de la tecnología en los invernaderos de bajo consumo energético de Almería. (Pérez-Parra et al., 2006)

Figura 6. Instalaciones de calefacción en número de invernaderos y en superficie.

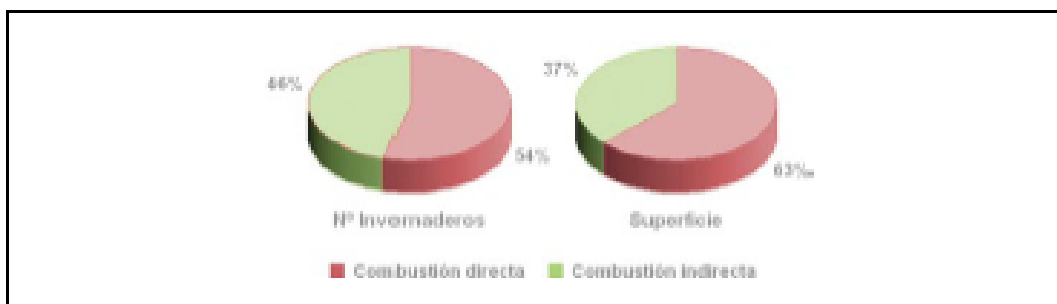
En la provincia de Almería los invernaderos equipados con un sistema de calefacción representan tan sólo un 0,5%, debido principalmente a que las necesidades de un sistema de calefacción son tan sólo de unos pocos días al año. El riesgo de heladas se reduce a menos de 10 días en la comarca de Almanzora y a un día al año en el resto de zonas invernadas.

El coste de la instalación de los sistemas de calefacción en las condiciones climáticas propias de la zona de Almería, en orden creciente es:

- aire caliente de combustión directa.
- aire caliente de combustión indirecta.
- agua caliente a baja temperatura.
- agua caliente a alta temperatura.

Aunque el sistema de calefacción más barato es el sistema de calefacción de aire caliente de combustión directa, no es muy recomendable su utilización, debido a los problemas de toxicidad que producen los gases procedentes de la combustión en el interior del invernadero. (López et al., 2000).

Los sistemas de calefacción más utilizados son los de aire caliente en sus dos variantes, tanto combustión directa como indirecta. En la figura 7 se recoge la distribución de los mismos.



Fuente: Tecnología de los invernaderos mediterráneos: evolución de la tecnología en los invernaderos de bajo consumo energético de Almería. (Pérez-Parra et al.,2006)

Figura 7. Distribución de los sistemas de calefacción por aire caliente en Almería.

### **3.10.2. TIPOS DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN.**

#### **3.10.2.1. CALEFACCIÓN DE TIPO CONVECTIVO.**

Son sistemas en los que el elemento conductor de calor es el aire. Debido a su poca inercia, proporcionan un aumento rápido de la temperatura del aire,



enfriándose de igual forma al dejar actuar. Generan importantes gradientes térmicos y pérdidas de calor al ir localizados, normalmente, sobre el cultivo (González-Real et al. 1983). Mediante el uso de tubos perforados próximos a las plantas, podemos mejorar la distribución del calor y aumentar la eficiencia del sistema.

Los sistemas de calefacción de tipo convectivo son poco eficientes. Además, el aire caliente pesa menos que el aire frío y tiende a elevarse, lejos de las plantas. Puede haber diferencias de temperaturas entre la base y lo alto de la planta de 2 a 3°C (Urban, 1997).

Estos sistemas (utilizan el aire como medio de transmisión de calor) se caracterizan por permitir un calentamiento rápido del invernadero, debido a la escasa inercia térmica del aire. Podemos diferenciar algunas ventajas de los sistemas de calefacción de tipo convectivo que son: el coste de la instalación es inferior al de los sistemas por agua caliente, aunque la vida útil del sistema también es más corta. Otra preeminencia que podemos destacar es la rápida respuesta, pero son de poca inercia térmica.

Suelen utilizarse en invernaderos de bajo coste (baratos), como sistemas de defensa de temperaturas muy bajas, donde interesa responder rápidamente ante posibles riesgos de excesivo descenso de temperaturas durante un corto periodo de tiempo y unas pocas veces al año. En ese caso suele mantenerse generalmente una temperatura de consigna de 5 a 7°C, para el arranque del sistema de calefacción (Urban, 1997).

Estos sistemas no están indicados en invernaderos donde buscamos aumentar la temperatura ambiental de forma más o menos continua para mejorar las condiciones de crecimiento del cultivo.

Se colocan sobre el cultivo, se sitúan muy próximos a la cubierta del invernadero, por lo que las pérdidas de calor a través del techo son elevadas. A causa del movimiento del aire se originan gradientes térmicos importantes en el interior del invernadero y esto conlleva a que se produzcan diferencias en la temperatura ambiental, es decir, se produce una gran heterogeneidad.

Entre los sistemas convectivos lo más utilizados son: aerotermos, generadores de aire caliente de combustión indirecta y generadores de aire caliente de combustión directa. Los dos últimos son los que mayoritariamente se instalan en Almería.

En el caso de generadores de aire, se puede mejorar la distribución del aire caliente utilizando mangas de polietileno perforadas (o poli-tubos) con orificios calibrados de unos 200-250 milímetros de diámetro para facilitar la distribución del aire caliente a nivel de la vegetación. Con estas mangas el alcance del chorro de aire caliente puede llegar a ser de 50 metros mientras que sin los conductos de polietileno el alcance es menor, unos 20 metros (Montero y Antón, 1994). Con la calefacción por aire caliente a través de mangas de polietileno se puede llegar a ser



de 50 metros mientras que son los conductos de polietileno el alcance del chorro de aire caliente a través de mangas de polietileno se puede llegar a observar un gradiente de temperatura de 1,5°C a una altura de 1,55 metros del suelo (Meneses y Monteiro, 1990).

El gradiente de temperatura que se origina a lo largo del invernadero depende de diferentes parámetros (posición y tamaño de los orificios de las mangas de polietileno, flujo de aire en las tuberías, pendiente del terreno en la dirección de medida).

Es importante en cualquier sistema de calefacción que el invernadero no tenga pendiente puesto que pequeñas inclinaciones del terreno originan bolsas de aire cálido en las zonas altas, con grandes gradientes de temperatura. Cuando ocurre esto, es necesario utilizar pequeños ventiladores para que agiten el aire y evitar de este modo que se produzcan esos gradientes térmicos.

Aproximadamente un 11-17% de la energía total aportada por calefacción por aire se utiliza para evapotranspiración (Teitel et al., 1999). La energía requerida para la evapotranspiración durante la noche es alrededor de un 10-20% de las necesidades de calefacción del invernadero (Kozai et al., 1982).

Los sistemas más utilizados de producción de aire caliente son los aerotermos que transmiten el calor de un cuerpo caliente y los generadores de aire caliente (combustión directa e indirecta) que queman un combustible, normalmente un gas y calientan el aire que es forzado a circular en el invernadero.

Una serie de ventajas e inconvenientes de este tipo de sistemas de calefacción serían:

- Coste de inversión moderado.
- Instalación fácil.
- Tiempo de respuesta relativamente corto.

Inducen fuertes gradientes térmicos: el aire caliente tiende a acumularse cerca de las paredes del techo y de esta manera aumentan sensiblemente las pérdidas térmicas del invernadero.

Los dos tipos de sistemas de calefacción de tipo convectivo que se utilizan bajo invernadero son:



#### **3.10.2.1.1. Generadores de aire caliente de combustión directa.**

Son equipos con un alto rendimiento en los que se queman un combustible (propano o gas natural), introduciendo en el invernadero aire caliente y gases que resultan del proceso de combustión, por ello el combustible que utilizan debe ser limpio. Es decir, en este tipo de aparato, el elemento calefactor se alimenta de combustible con un contenido de azufre muy bajo (gas natural, propano, etc.), menos de 0,03% de azufre (Urban, 1997).

Como pueden generar otros gases, como el etileno (Hanan, 1998), los sistemas directos suelen sólo utilizarse en calefacción para defensa de bajas temperaturas excepcionales (de corta duración) y de apoyo.

Los productos de la combustión, si ésta es completa, se limitan a vapor de agua y CO<sub>2</sub> que pueden inyectarse directamente al aire del invernadero. Pero, si la combustión es deficiente, la inyección de CO<sub>2</sub> puede anular el efecto positivo de la inyección carbónica.

Los riesgos principales, si el combustible no tiene azufre, provienen del monóxido de carbono (combustión incompleta, puesta en marcha y parada repetida del quemador) y de los óxidos de nitrógeno (NO, NO<sub>2</sub>) formados en la atmósfera bajo el efecto de la temperatura de llama.

Actualmente, estos aparatos son un medio económico para enriquecer la atmósfera en CO<sub>2</sub>. No obstante, la producción de CO<sub>2</sub> ( $\approx 2\text{kg}$  por m<sup>3</sup> de gas), que se da esencialmente en períodos nocturno, no es concomitante con la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> del dosel vegetal (período diurno). Requiere gran atención la concentración de CO<sub>2</sub> en el curso de la noche para evitar niveles demasiado elevados.





Figura 8. Calefactor por generación de aire caliente directo.

En la comarca del Almazora algunos invernaderos utilizan estufas en las que se puede adquirir calor tanto por combustión de gasoil como por medio de resistencias eléctricas. Estas estufas tienen una potencia calorífica de unas 30kW. Su principal inconveniente es que tanto el aire caliente como los gases de combustión son incorporados al invernadero. El combustible a utilizar debe de contener el menor número de elementos tóxicos, siendo el propano y el gas natural los más recomendados.



Figura 9. Sistema con combustión directa.

Es importante controlar los niveles de los gases de combustión para evitar problemas a personas y plantas. El rendimiento de la máquina se considera del 100% al introducir también el calor que acompaña a los gases de combustión.

Este sistema de calefacción es muy efectivo como método de lucha contra heladas, ya que un simple termostato conecta las estufas cuando la temperatura desciende bruscamente evitando que llegue a 0°C.

En Almería la mayoría de los semilleros disponen de cañones de calefacción. Estos generadores de aire caliente llevan un quemador y un ventilador de gran capacidad (de 3000 a 6000 m<sup>3</sup>/h) lo que hace que tengan una elevada potencia térmica (20-80 kW).

Habitualmente están provistos con electroválvula, termopar y termostato de seguridad.

Además pueden ir provistos de presostatos de seguridad para parada en caso de falta de aire. A través de un simple termostato que funcione con la temperatura ambiente puede automatizarse su funcionamiento. Las sondas de temperatura normalmente se encuentran a unos 30 metros de los generadores de aire caliente.



#### **3.10.2.1.2. Aparatos equipados con un cambiador de calor.**

Aerotermos: transmiten el calor de un cuerpo caliente al aire.

Los más empleados son los aerotermos de agua ya que los eléctricos son más costosos debido a su consumo eléctrico. Disponen de dos unidades funcionales:

- cambiador, formado por una red de tubos en aletas.
- ventilador.

El agua caliente procede de una caldera, ésta circula por el interior de los tubos metálicos entre los que el ventilador pulsa el aire ambiente del invernadero que, en contacto con la superficie de los tubos, se calienta antes de pasar de nuevo al invernadero. Es decir, el agua caliente intercambia calor por convección con el aire. La superficie de contacto aumenta con las aletas y el ventilador mejora los intercambios.

Los aerotermos clásicos funcionan con temperaturas de agua elevadas (entre 60 y 100°C), los más recientes funcionan con temperaturas de agua mucho más bajas (generalmente inferiores a 60°C) ya que tienen un cambiador de calor de mayor superficie de intercambio.

Se trata realmente de un sistema mixto (calefacción por agua caliente y aire caliente).

#### **3.10.2.1.3. Generadores de aire caliente de combustión indirecta.**

Los gases tóxicos que se liberan dentro del invernadero, puede suponer problemas, tanto para las personas como para las plantas. Para evitar estos problemas, se utilizan los generadores de aire caliente de combustión indirecta, mediante un cambiador de calor, se separan los gases de combustión expulsándolos al exterior, introduciendo únicamente aire caliente al invernadero. Dado que parte del calor es expulsado con los gases de combustión, el rendimiento de estas máquinas suele estar entre el 80% - 90%.



Figura 10. Distribución del calor mediante mangas perforadas de polietileno para un sistema de combustión indirecto.

En la zona costera es muy raro encontrar invernaderos equipados con un sistema de calefacción de este tipo, puesto que el riesgo de heladas es prácticamente despreciable. Para estos invernaderos se pueden utilizar generadores de aire caliente con el fin de aumentar las bajas temperaturas invernales manteniendo una temperatura interior superior a 10°C de forma que el cultivo se desarrolle en condiciones óptimas. En este caso no se intenta evitar daños en el cultivo por heladas, sino que el objetivo es acelerar la entrada en producción del cultivo con fines comerciales.

Están compuestos por un quemador de gasoil, uno o dos ventiladores y una red de finos tubos metálicos por donde circula el aire caliente antes de ser expulsado.

El ventilador principal suministra aire al quemador e impulsa el aire resultante de la combustión fuera del invernadero haciéndolo pasar a través de un tubo metálico de 0,5 metros de diámetro con una longitud de unos 8-10 metros. Este sistema proporciona 125KW, con un caudal de ventilación de 8000 m<sup>3</sup>/h. Además se coloca un segundo tubo de 1 metro de diámetro rodeando el primero, por donde circulan los gases de escape, con una longitud de 5-6 metros. En uno de sus extremos se coloca un segundo ventilador con un caudal de 4000 m<sup>3</sup>/h, de manera



que al aumentar la convección en la superficie del tubo donde circula el aire caliente se obtienen 25kW suplementarias (Valera et al., 1999).

La temperatura de la planta suele ser inferior a la del aire, lo que implica riesgos de condensación de agua en las superficies vegetales y, al no aportar calor por radiación, no calienta el suelo en época fría (Bordes, 1992).

El control de los generadores se puede realizar automáticamente, mediante termostatos ambientales colocados a la máxima altura del cultivo, o por programación, en la que se hace funcionar la calefacción un cierto período de tiempo, generalmente por la noche.

Estos equipos permiten realizar un salto térmico entre el aire del interior del invernadero y el aire exterior de hasta 10°C, de manera que la temperatura del cultivo se puede mantener siempre por encima de dicha temperatura.

#### **3.10.2.2. CONTROL DE LOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN POR AIRE CALIENTE.**

El control de estos sistemas debe ser muy cuidadoso debido al elevado consumo energético, que los sistemas de calefacción por aire producen durante su utilización.

Generalmente se usan en los momentos donde se prevén grandes descensos de temperatura, es decir, para evitar temperaturas extremas, y no se utilizan con la intención de mantener niveles altos de temperatura durante períodos de tiempo prolongados, para conservar unas condiciones de crecimiento óptimas para el cultivo.

##### **3.10.2.2.1. Potencia de calefacción.**

En un equipo de calefacción por aire caliente la capacidad para suministrar calor dependerá del tipo de combustible que se utilice para generar energía y del rendimiento calorífico de la propia máquina.

La potencia nominal que sería desarrollada por estos generadores viene dada por el calor liberado al quemarse el combustible:

$$P_N = q_{mc} \cdot PCI \quad [kW]$$



Donde;

$q_{mc}$ : caudal másico de combustible consumido  $[kg / s]$ .

$PCI$ : poder calorífico inferior del combustible  $[kJ / kg]$ .

El poder calorífico inferior de alguno de los combustibles utilizados en los invernaderos es de forma aproximada:

*Gasoil*:  $42500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

*Propano*:  $47700 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

*Fuel – oil*:  $40200 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

*Gas natural*:  $42000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Por otro lado, el rendimiento térmico del generador de aire caliente se define como la relación entre la potencia útil obtenida y la potencia nominal:

$$\eta = P_u / P_N$$

Donde;

$P_u$ : potencia útil (energía calorífica que el generador realmente transmite al aire y que se utilizará para incrementar su temperatura).

En los generadores de combustión directa la energía liberada por el combustible es transmitida al aire del invernadero, por ello la potencia útil ( $P_u$ ) y la nominal ( $P_N$ ) son iguales y por tanto el rendimiento del equipo en estos casos es del 100%.

### 3.10.2.3. SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR CONDUCCIÓN.

Estos sistemas están diseñados para proporcionar una temperatura adecuada en la zona radicular. Desde un punto de vista físico, uno de los objetivos de la calefacción del suelo es utilizar, indirectamente, la superficie de intercambio con el aire que ofrece el suelo del invernadero, ya que ésta es superior a la de los sistemas de calefacción aéreos (Feuilloley y Baille, 1992). Desde una caldera central se aporta calor al suelo a través de tuberías enterradas, circulando el agua a temperatura inferior a  $40^\circ\text{C}$ , siendo la distribución de calor uniforme y proporcionando mayor eficiencia que los sistemas por aire caliente. El elevado coste inicial y la dificultad para realizar labores en el suelo (al ir enterradas las tuberías a menos de 50 cm) han limitado el desarrollo de estos sistemas.



El cultivo fuera de suelo, debido a su baja inercia térmica, la temperatura en la zona radicular se aproxima a la temperatura del aire, pudiendo en periodos fríos limitar el desarrollo de los cultivos. La fácil localización de los cambiadores de calor, bajo los sustratos sobre los mismos, ha permitido su expansión en estos sistemas de cultivo.

#### **3.10.2.4. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN POR CONVECCIÓN-RADIACIÓN.**

##### **3.10.2.4.1. Sistemas de calefacción por agua caliente.**

En las zonas de climas muy fríos o cuando se desea incrementar la temperatura ambiente durante periodos de tiempo prolongados se hace necesaria la instalación de sistemas de calefacción por medio de agua caliente. En una caldera se produce el calentamiento de agua mediante quemadores de gas propano o gasoil. El agua caliente se distribuye mediante un sistema de tuberías por todo el invernadero retornando a la caldera tras haber dejado parte de su calor. (Valera, 2002).

Estos sistemas son más caros que los convectivos, pero son más eficientes y tienen mayor inercia térmica.

En estos sistemas el calentamiento del aire se produce por convección al entrar en contacto con los tubos, genera un calentamiento del suelo y del cultivo. (Valera, 2002).

Hoy día, estos sistemas funcionan con circulación forzada por bombas de circulación de agua, que mejoran su eficiencia y permiten poder distribuir el calor sin restricciones. También hacen posible el uso de tubos de menor diámetro que en los sistemas originarios de circulación natural.

En una caldera se produce el calentamiento del agua por medio de quemadores de gas propano o gasoil. El agua caliente se distribuye mediante un sistema de tuberías por todo el invernadero retornando a la caldera tras haber dejado parte de su calor.

Como las tuberías de conducción del agua caliente se encuentran alrededor de las plantas, se consiguen bajos gradientes de temperatura y gran uniformidad en el reparto de calor.

Un sistema de calefacción consta de los siguientes elementos:

- Depósito de combustible.
- Equipo de combustión o quemador.
- Calderín de expansión.





- Caldera de calefacción.
- Tuberías de distribución.
- Bomba de impulsión.
- Accesorios de seguridad y regulación (presostatos, termostatos, válvulas de nivel de tres vías, etc.).

- **Caldera:**

Los sistemas de calefacción por agua caliente de mayor importancia son las calderas, pues de sus características dependerá la capacidad del sistema para generar calor.

Podemos diferenciar distintos tipos de calderas en función de su aporte calorífico:

- Combustibles sólidos: carbón, biomasa residual (huesos de oliva, cascara de almendra, etc.)
- Combustibles líquidos: gasóleo, fuel, biocombustibles.
- Combustibles gaseosos: gas natural, gases licuados del petróleo.
- Eléctricas.

También podemos distinguir los tipos de calderas según la disposición de los fluidos:

- Piro tubulares: tubos de circulación de humos.
- Acuotubulares: tubos de circulación del agua.

Aproximadamente casi todas las calderas que se utilizan en los invernaderos son de tipo piro tubular en las que se hace circular el aire caliente por una serie de tubos que atraviesan la masa de agua que se ha de calentar. Se producen tres pasos de gases, dentro de la caldera, dos en el fogón y un paso en los tubos de humo. Los gases resultantes de la combustión primero pasan por el hogar, después por la cámara de postcombustión, donde sufren un giro en su dirección para iniciar su paso por los tubos de humo.

A lo largo de todo el recorrido del aire caliente dentro de la caldera se pueden implementar retardadores de gases que hacen que el flujo en éstos sea más turbulento, permitiendo aumentar el tiempo de residencia de los gases en la caldera.

Las paredes de los tubos de circulación de los gases son ondulados para aumentar la superficie de contacto con el agua de la caldera, para absorber las deformaciones debidas a los procesos de contracción y dilatación.





El cuerpo de presión de la caldera está constituido por un cilindro de acero de alta calidad, cerrado por sus dos extremos. La pared lateral se denomina casco o tambor y la de los extremos fondos.

El hogar está constituido por un tubo cilíndrico de paredes onduladas que enlazan con otro tubo de mayor diámetro y menor longitud que constituye la cámara de postcombustión. El hogar está desplazado del eje de la caldera para mejorar la circulación del agua, y al mismo tiempo, permitir una optimización en el reparto de superficies de calefacción. El hogar está desplazado del eje de la caldera para mejorar la circulación del agua y así, permitir una optimización en el reparto de superficies de calefacción.

El gran volumen en la cámara de combustión de las calderas les permite absorber, completamente, el calor por radiación generado por la combustión.

La puerta frontal es abatible para permitir el acceso a todos los tubos, fogón, retardadores y cabeza de combustión del quemador, para la realización de las labores de mantenimiento.

Las calderas utilizadas para calefacción de agua en invernaderos trabajan con presiones de 10- 20 bares y temperaturas de salida del agua entre 60-80 °C.

### **3.10.2.5. CONTROL DE LOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN POR AGUA CALIENTE.**

#### **3.10.2.5.1. Potencia de calefacción.**

La potencia útil  $P_u$  transmitida al agua de calefacción por la combustión y el intercambio de calor con los gases es:

$$P_u = q_{mw} \cdot (i_{sal} - i_{ent}) = q_{mw} \cdot c_{PA} \cdot (T_{sal} - T_{ent}) \quad [KW]$$

donde,

$q_{mw}$  caudal másico o flujo de agua que pasa por la caldera  $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$i_{sal}, i_{ent}$  entalpía del agua a la salida y la entrada de la caldera  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

$T_{sal}, T_{ent}$  temperatura del agua a la salida y la entrada de la caldera  $[K]$

$c_{PA}$  calor específico del agua líquida 4,19  $[kJ/kg \cdot K]$

La potencia nominal del quemador viene dada por la expresión:



$$P_N = qu_{mc} \cdot PCI \quad [KW]$$

donde,

**$qu_{mc}$**  caudal másico de combustible consumido [ $Kg/s$ ]

**$PCI$**  poder calorífico inferior de combustible [ $KJ/Kg$ ]

El rendimiento térmico de la caldera se define como la relación entre la potencia útil obtenida y la potencia nominal:

$$\eta = P_u / P_N$$

Las potencias útiles proporcionadas por las calderas disponibles comercialmente son muy amplias, entre 80kW y 4000kW, consiguiendo rendimientos del 85-90%.

Igualmente existen calderas que proporcionan flujos de agua entre 125 y 30000 kg/h.

### 3.10.2.5.2. Tuberías de calefacción:

Es otro elemento que determina la capacidad de ceder energía de los sistemas de calefacción por agua caliente. Distribuyen el calor dentro del invernadero.

En los sistemas convencionales el agua circula a altas temperaturas (50-80 °C), a alturas de 0,3- 0,1 metros del suelo. Su eficiencia térmica no es buena, puesto que pierden el 50% por radiación hacia la cubierta (Urban, 2007), por ello debe asociarse a pantallas térmicas que limiten esas pérdidas.

Los tubos de calefacción más empleados son de sección circular aunque hay otros tipos y pueden colgarse de cadenas para desplazarlos en vertical al crecer el cultivo.

Dichos tubos metálicos suelen ser de acero y, también, de aluminio. Hoy día, se ha generalizado el empleo de los tubos de calefacción a pares, como guías para transporte de carretillas y elementos de mecanización.

Puede, en esos casos, complementarse la instalación de calefacción instalando tubos (a baja temperatura) entre la vegetación, para evitar que se produzca condensación de agua en el cultivo (Kamp et al., 1996).

La transferencia de calor de los tubos de calefacción dependerá del tipo de tubo empleado (materia y características: diámetro, con o sin aletas, etc.) y de la



diferencia de temperaturas entre el tubo y el aire del invernadero. La tabla siguiente resume algunos datos al respecto.

**Transferencia de calor, en vatios por metro lineal de tubo de calefacción, a varias diferencias de temperatura entre el tubo y el aire del invernadero.**

Diferencia de T (°C)	Tubo de acero. Diámetro (mm)			Tubo de plástico. Diámetro (mm)
	51	33,2	26,4	
10	15	10	8	6
20	34	23	18	14
30	55	38	31	24
40	77	53	44	35
50	101	71	58	46
60	128	90	73	-
70	156	108	90	-
80	185	129	107	-

Tabla 11. – Transferencia de calor, en vatios por metro lineal de tubo de calefacción, a varias diferencias de temperatura entre el tubo y el aire del invernadero (Adaptado de Van de Braak, 1995).

Existen distintos modelos de circuitos en función del tipo y número de tubos utilizados y de su posición con respecto al suelo y las líneas de plantas.

- **Tuberías sobre el suelo.**

Este sistema consiste en la colocación de tuberías metálicas sobre el suelo, a unos 15-20 cm de altura mediante unas piezas metálicas denominadas bancadas, por las que circula agua a alta temperatura. La temperatura del agua en la caldera suele graduarse a 80 o 90°C, y el agua de retorno no debe llegar a menos de 50-60°C para evitar condensaciones en la caldera.

Las tuberías metálicas, pueden ser de acero, normalmente con un diámetro de 2 pulgadas (51mm), o de aluminio, de unos 28mm. Las tuberías de acero presentan la ventaja de poder ser utilizadas como raíles, permitiendo la utilización de carros de transporte, para elevación de los operarios o incluso para aplicación de productos fitosanitarios.



Las nuevas instalaciones de invernaderos multitúnel están dotadas en su mayoría con sistemas de calefacción mediante tuberías de agua caliente a alta temperatura.

- **Tuberías alrededor del cultivo.**

La calefacción por agua a baja temperatura es un caso particular. Consiste en hacer circular agua a temperatura no muy alta (30-50°C) por medio de tuberías corrugadas de unos 15-16 centímetros de diámetro que se colocan en torno al cultivo. Este sistema sustituye la elevada temperatura por una mayor proximidad y un mayor número de tuberías, 4 o 6 por línea de plantas. Con estos equipos se pueden conseguir aportes térmicos de hasta 90 w/m<sup>2</sup>.

La temperatura del agua se regula mezclando agua caliente (de la caldera) con agua fría (de retorno) mediante válvulas de tres vías.

Es calefacción localizada, con tubos fijos o móviles y también de planchas radiantes (acolchado radiante). Se coloca lo más cerca posible del cultivo. Se emplea como calefacción de base, o asociada a una calefacción de suelo o sustrato, o como calefacción de apoyo.

El sistema de calefacción de baja temperatura es baja de inversión, fácil de colocar y flexible. Permite ahorro de energía, respecto a los sistemas tradicionales, de hasta un 30% (Urban, 1997).

Este sistema permite el empleo de materiales más económicos que las tuberías de acero o aluminio, como el polietileno de alta densidad o el polipropileno (Barret et al., 1978; Rampinini, 1989).

Las tuberías de polipropileno son mejores que las de polietileno, ya que si por algún motivo se avería la válvula mezcladora y entra agua de la caldera a temperatura elevada, el polipropileno soporta mejor las temperaturas altas (ASAE, 1981).

#### **3.10.2.5.3. Energía transmitida desde las tuberías de calefacción.**

La transferencia de calor total desde un tubo de calefacción al ambiente que le rodea dependerá de la superficie radiante del tubo y de la diferencia de temperatura entre el tubo y el aire dentro del invernadero. Considerando el caso general de tubos con aletas, su valor se puede determinar mediante la ecuación siguiente:

$$Q_{cal} = L_p \cdot [\pi \cdot D_0 + \eta \cdot p] \cdot (q_c + q_r) \quad [w]$$

donde,

$L_p$  longitud de las tuberías de calefacción dentro del invernadero [m]

$D_0$  diámetro exterior de la tubería [m]

$p$  perímetro de las aletas ( $p = 2 \cdot (2 \cdot I + z)$ ) [m]

$I$  anchura de la aleta [m]

$\eta$  eficacia de la aleta.

El término entre corchetes presenta el perímetro del tubo con aletas, y  $q_c$  y  $q_r$  son representativamente la transferencia de calor por convección y por radiación de la superficie exterior del tubo.

### 3.10.2.5.3.1. Transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección entre una superficie y un fluido es una función compleja que depende de la geometría y la temperatura de la superficie, de la temperatura y la velocidad del fluido y de las propiedades termofísicas de éste.

En el caso de la superficie exterior de los tubos de calefacción en contacto con el aire del invernadero la ley de enfriamiento de Newton presenta la forma:

$$q_c = h_0 \cdot (T_0 - T_i) \quad [W/m^2]$$

donde,

$h_0$  representa el coeficiente de transferencia de calor por convección [ $W/Km^2$ ].

$T_0$  temperatura de la superficie del tubo de calefacción [ $^{\circ}C$ ].

$T_i$  temperatura del aire que rodea las tuberías (fluido en flujo libre) [ $^{\circ}C$ ].

$h_0$  no es una constante sino una función de muchos parámetros que describen el proceso de transferencia calor.

Según Fishenden y Saunders (1957), el coeficiente de transferencia de calor por convección se puede expresar en función del número adimensional de Nusselt (Un) mediante la fórmula:

$$h_0 = Nu \cdot K_a / d_{car}$$

donde,

$d_{car}$  dimensión característica de la superficie de contacto (m).



$K_a$  conductibilidad térmica del aire,  $0,0267 (W/m \cdot K)(a 300K)$ .

Los procesos de transferencia de calor por convección dependen del régimen de flujo del fluido al que se transfiere de energía y que en este caso es el aire que rodea a los tubos.

La característica del flujo del aire se realiza mediante diferentes números adimensionales que relacionan los parámetros físicos implicados en el movimiento del fluido y la difusión del calor dentro de éste. Además del número adimensional de Nusselt ( $Un$ ), se utilizan otros tres números: de Rayleigh ( $Ra$ ), de Grashof ( $Gr$ ) y de Prandtl ( $Pr$ ). Estos cuatro números se relacionan entre ellos mediante las siguientes expresiones:

$$Nu = c_o \cdot Ra^n$$

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$Gr = g \cdot \beta_a \cdot d_{car}^3 \cdot (T_0 - T_i) / \nu_a^2$$

$$Pr = \nu_a / \Lambda$$

$$\Lambda = K_a / \rho_a \cdot c_{par}$$

donde,

$c_o$  coeficiente adimensional de proporcionalidad.

$\beta_a$  coeficiente volumétrico de expansión del aire (para un gas ideal  $(\beta_a = 1/T)(K^{-1})$ ).

$c_{par}$  calor específico del aire,  $1005 (J \cdot kg \cdot K)(a 300K)$

$\rho_a$  densidad del aire,  $1.177 (kg/m^3)(a 300K)$

$g$  aceleración gravitatoria,  $9.806[m/s^2]$ .

$\nu_a$  viscosidad cinemática del aire,  $15.66 \cdot 10^6 [m^2/s](a 300K)$

$\Lambda$  difusividad térmica del aire,  $22.5 \cdot 10^6 [m^2/s] (a 1 atm)$

De las relaciones entre los diferentes parámetros y números adimensionales que definen el flujo del aire se pueden deducir las siguientes expresiones:



$$h_0 = c_a \cdot (T_0 - T_i)^n \quad [W/K \cdot m^2]$$

$$q_c = c_a \cdot (T_0 - T_i)^{n+1} \quad [W/m^2]$$

Siendo:

$$c_a = \left\{ c_0 / \left[ d_{car}^{(1/n)-3} \cdot v \cdot \Lambda / (g \cdot \beta \cdot \lambda^{1/n}) \right]^n \right\}$$

Para un cilindro horizontal (las tuberías de calefacción) la dimensión característica de la superficie de con el aire,  $d_{car}$ , se debe tomar como el diámetro exterior  $D_0$ .

Los coeficientes  $c_0$  y  $n$  pueden ser obtenidos de forma experimental o teóricamente. Generalmente, la constante  $c_0$  se presenta como dependiente de la geometría y orientación de la superficie considerada, e el exponente  $n$  dependiente sólo del régimen de la convección.

En el régimen laminar ( $10^3 < Ra < 10^9$ ) empieza cuando se produce un flujo de circulación del aire, es decir con pequeñas velocidades. Este régimen se caracteriza por las corrientes convectivas paralelas a la superficie. El transporte de calor depende del transporte por difusión entre las capas fluidas.

El régimen turbulento ( $Ra > 10^9$ ) aparece cuando el flujo se hace inestable y surgen vórtices. Este régimen se caracteriza por las fluctuaciones en la velocidad, temperatura y presión.

**Valores de los coeficientes  $c_a$  y  $n$  según la situación exterior,  $h_0$ , también se puede determinar, para el caso de flujo de laminar en tuberías de calefacción.**

<i>Situación de las tuberías de calefacción</i>	$c_a$	$n$
Tuberías sobre el suelo con cultivo	$3.42 \pm 0.12$	$1/4$
Tuberías sobre el suelo sin cultivo	$2.90 \pm 0.19$	$1/4$
Tuberías bajo las pantallas sin cultivo	$2.98 \pm 0.18$	$1/4$

Tabla 12. Valores de los coeficientes  $c_a$  y  $n$  según la situación exterior,  $h_0$ , también se puede determinar, para el caso de flujo de laminar en tuberías de calefacción, mediante la expresión (Hollman, 1992).

$$h_0 = 1.32 \cdot [(T_0 - T_i)/D_0]^{0.25} \quad [W/K \cdot m^2]$$



Mantalla y Montero (1995) proponen otros coeficientes para la transmisión de calor desde las tuberías de calefacción al ambiente del invernadero donde la temperatura del aire es  $T_i$ :

$$h_0 = 4.34 \cdot (T_0 - T_i)^{5/4} \cdot D_0^{3/4} \quad [W/K \cdot m^2]$$

### 3.10.2.5.3.2. Transferencia de calor por radiación.

La cantidad de calor radiada por unidad de superficie se puede calcular mediante la expresión:

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon_{tb} \cdot (T_0^4 - T_i^4) \quad [W/m^2]$$

donde,

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman,  $5.67 \cdot 10^8 [W/m^2 \cdot K^4]$

$\varepsilon_{tb}$ : emisividad de las tuberías de calefacción.

**Valores de la emisividad para algunos materiales utilizados en tuberías de calefacción.**

<b>Material</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>
Acero inoxidable	0.26-0.42
Aluminio	0.03-0.05
Asfalto	0.88
Hierro oxidado	0.30-0.57
Pintura negra	0.80-0.92
Pintura blanca	0.85-0.90

Tabla 13. Valores de la emisividad para algunos materiales utilizados en tuberías de calefacción (adaptado de Mills, 1995).



### Evolución temporal de la transferencia de calor.

En un proceso de transferencia de calor estable, las temperaturas de los tubos y el aire del invernadero son constantes con respecto al tiempo. El suministro de calor al invernadero puede por consiguiente, calcularse mediante la expresión:

$$Q_{cal} = qu_w \cdot c_w \cdot (T_{ent} - T_{sal}) \cdot \Delta t \quad [J]$$

$qu_w$  tasa de flujo de masa del agua de calefacción [ $kg/s$ ]

$c_w$  calor específico del agua líquida, 4190 [ $J/kg \cdot K$ ]

$T_{ent}$  temperatura del agua a la entrada de las tuberías [ $K$ ]

$T_{sal}$  temperatura del agua a la salida de las tuberías [ $K$ ]

$\Delta t$  periodo de tiempo de cada ciclo de calefacción [ $s$ ]

Sin embargo, cuando prevalecen las condiciones del estado de inestabilidad, el cálculo de energía también tiene que tener en cuenta el almacenamiento térmico, en el agua y el material del tubo. La energía proporcionada en este caso durante  $n$  ciclos de calefacción puede estimarse mediante la expresión (Teitel et al.,1996):

$$Q_{cal} = \sum_{j=1}^n [qu_w \cdot c_w \cdot (T_{ent} - T_{sal})_j \cdot \Delta t + (m_w \cdot c_w + m_p \cdot c_p) \cdot (T_{med} - T_0)_j] \quad [J]$$

Donde el término de la izquierda en la suma representa la energía proporcionada durante un tiempo  $\Delta t$  cuando la válvula en la tubería principal está abierta y el agua caliente está circulando a través del tubo, y el término de la derecha representa la energía proporcionada durante el enfriado del tubo cuando la válvula está cerrada. La temperatura al principio de la fase de enfriamiento,  $T_{med}$  se calcula como el promedio de las temperaturas a la entrada y a la salida del agua al inicio del periodo de enfriamiento:



$$T_{med} = (T_{ent} - T_{sal})/2$$

Al final del periodo de enfriamiento de un ciclo de calefacción la temperatura del tubo y del agua son iguales a  $T_0$ .



## **4. MATERIAL Y MÉTODOS.**

### 4.1. DESCRIPCIÓN.

---

La realización de este trabajo monográfico ha tenido lugar en el laboratorio de climatización de la Universidad de Almería. Posee una superficie de  $7,4 \times 6,2 \text{ m}^2$  y una altura de  $2,96 \text{ m}$ . Los ensayos se han realizado en él, ya que sólo disponíamos de dos únicos paneles MN. El laboratorio nos ofrecía una gran gama de posibilidades a la hora de realizar las conexiones a la corriente. Además de los diversos aparatos de medida conectados al ordenador.



Figura 11. Vista de la ubicación del ensayo en el laboratorio.



Figura 12. Perspectiva lateral de la ubicación del ensayo en el laboratorio.

Los equipos y materiales de medida que se utilizaron en los ensayos fueron:

- Dos *Epipremnum aureum*.
- Paneles EyCA.
- Cámara termográfica Thermo-Vision™ A40-M.
- Sensores de contacto SR –TFH-DISC.
- Registradores autónomos de temperatura.
- Software ThermoCAM™ Researcher Pro 2.8 S.
- Polímetro.

### 4.1.1. Epipremnum aureum.

Para llevar a cabo los ensayos se necesitaron dos macetas denominadas *Epipremnum aureum* comúnmente conocidas como "potus", "pothos" o "potos" (antiguamente clasificado dentro del género *Pothos* ) es una especie de la familia Araceae nativa del sudeste asiático (Malasia, Indonesia) y Nueva Guinea.



Figura 13. *Epipremnum aureum*.

De los *Epipremnum aureum* podemos destacar entre sus características más singulares que la liana puede alcanzar 20 m de alto, con tallos de hasta 4 cm de diámetro. Trepa mediante raíces aéreas que se enganchan a las ramas de los árboles. Las hojas son perennes, alternas y acorazonadas, enteras en las plantas jóvenes, pero irregularmente pinnadas en las maduras y de hasta 1 m de largo por 45 cm de ancho (en las plantas jóvenes, no superan los 20 cm de largo). Las flores surgen en una espata de más de 23 cm de largo.

El *Epipremnum aureum* es una popular planta de interior con numerosos cultivares seleccionados por tener hojas variegadas de color amarillo, blanco o verde claro. A menudo, se utiliza como elemento decorativo en centros comerciales, oficinas e instalaciones públicas, principalmente porque es una especie de aspecto atractivo, muy resistente y que requiere pocos cuidados. Es también eficaz contra la contaminación ambiental en interiores, eliminando formaldehído, xileno y benceno.

Como planta interior puede alcanzar más de 2 m de altura si se le da el soporte adecuado (un tutor para trepar). Los mejores resultados se consiguen



proporcionándole luz media indirecta; tolera una luminosidad intensa, pero largos periodos de luz solar directa queman las hojas. Vegeta bien con una temperatura de entre 17 a 30 °C. Generalmente sólo necesitará riego cuando la tierra se note seca al tacto. Se puede añadir un fertilizante líquido en primavera y se debe replantar cada dos años. Sin embargo, es una planta muy robusta que soporta las malas condiciones de cultivo. En cultivo hidropónico crece rápidamente.

### 4.1.2. Paneles radiantes EyCA.

El panel MN está proyectado y diseñado para realizar instalaciones de transferencia térmica económica, eficiente, de mínimas dimensiones y de rápida instalación. Ya que la electrónica más avanzada se pone al servicio de la eficiencia energética.



Figura 14. Paneles radiantes MN

El panel MN incorpora diseños estructurales y materiales con los criterios más evolucionados, para satisfacer los máximos niveles de seguridad activa y pasiva en sistemas de transferencia térmica. Es una nueva tecnología del futuro aplicada a los sistemas de calefacción.

El desarrollo tecnológico y la evolución de los nuevos materiales han permitido obtener un efecto natural, con un nivel ecológico y un resultado de confort medioambiental, realmente excelentes. Todo ello con unos consumos energéticos considerablemente reducidos.





### PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL PANEL MN

El principio de funcionamiento de los paneles radiantes MINICADIF se basa en lo siguiente:

Los paneles radiantes producen emisión de calor en la gama definida de infrarrojos a baja temperatura, que son los más naturales que existen, no tiene ningún efecto negativo, al contrario, todos los efectos que producen son totalmente beneficioso (similar a la energía del sol).

Los elementos de calefacción están fabricados con tecnología completamente innovadora, de hecho sus características constructivas son una novedad mundial, su tecnología no tiene ninguna relación con la aplicada actualmente en este ámbito. El principio eléctrico de los paneles, no está basado en materiales de alta resistividad eléctrica, sino en material de alta conductibilidad eléctrica.

La energía absorbida por el sistema se transmite a los cuerpos de forma idéntica a como lo hace el sol, aún cuando este se caliente de forma indirecta, por el principio de equilibrio térmico.

Transmitir la energía eléctrica absorbida, en forma de energía calorífica, fundamentalmente a los cuerpos sin necesidad de calentar el aire, es la variable básica que diferencia a los sistemas de calefacción por paneles radiante.

La inercia térmica del panel está diseñada para tener una rápida reacción y ser controlada con gestión inteligente, para que el calor sea irradiado y utilizado sólo donde se necesita, no en cualquier lugar.

Por gestión inteligente de un sistema de calefacción se entiende la capacidad del propio sistema para producir la temperatura deseada, al máximo nivel, con el mínimo coste energético posible.

Los sistemas de calor radiante tienen una inercia térmica muy baja, el tiempo que emplean en crear el nivel térmico deseado no está basado en la temperatura del aire; los paneles de calor radiante, están transmitiendo energía calorífica desde el mismo instante de su conexión, por lo que la temperatura idónea se obtendrá en minutos.

Los paneles radiantes cumplen con las siguientes directivas y normativas europeas.

72/23/CEE Sobre garantía de seguridad de material eléctrico.



89/336/CEE Sobre compatibilidad electromagnética.

92/31/CEE Sobre armonización de compatibilidad electromagnética.

93/68/CEE Sobre conformidad de productos eléctricos.

EN 60335-1 Sobre seguridad de aparatos electrodomésticos

EN 60335-2-30 Sobre seguridad de aparatos electrodomésticos. Requisitos de calefacción.

EN 300-220 Sobre el espectro de radiación.

ETS 300683 Sobre frecuencias de comunicación.

### **4.1.3. Cámara termográfica Thermo-Vision™ A40-M.**

Se usó una cámara, modelo Thermo-Vision™ A40-M de la marca ThermoCam, cuya calibración está normalizada para medir las temperaturas que alcanzan las plantas, también se destinó para evaluar la temperatura que llegaban los paneles a distintas potencias. Seguidamente se detallarán sus características.

La cámara en el momento de su conexión está obteniendo resultados. La cámara percibe en sus resultados pequeñas variaciones de temperatura, no detectables por cualquier otro medio y se visualizan claramente por una imagen térmica. Por ello la cámara a través de sus imágenes térmicas permite encontrar y resolver problemas a tiempo, por lo que puede mejorar la calidad del producto y es garantía de un ahorro de miles de euros.

La cámara Thermo-Vision™ A40-M fue diseñada para que en el plano detector ofreciera una imagen radiométrica exacta y que la medida térmica de la temperatura fuera repetible.

La proyección de la imagen es excepcional y además posee una alta sensibilidad térmica. El A40M cuenta con un avanzado microbolómetro, sin refrigeración con tecnología FPA, es un detector de radiación infrarroja de onda larga que emite imágenes nítidas en una multitud de gamas de colores lo que permite ver las variaciones de temperatura. Además puede revelar vídeo estándar (60 Hz) y generar imágenes claras de objetos en movimiento.

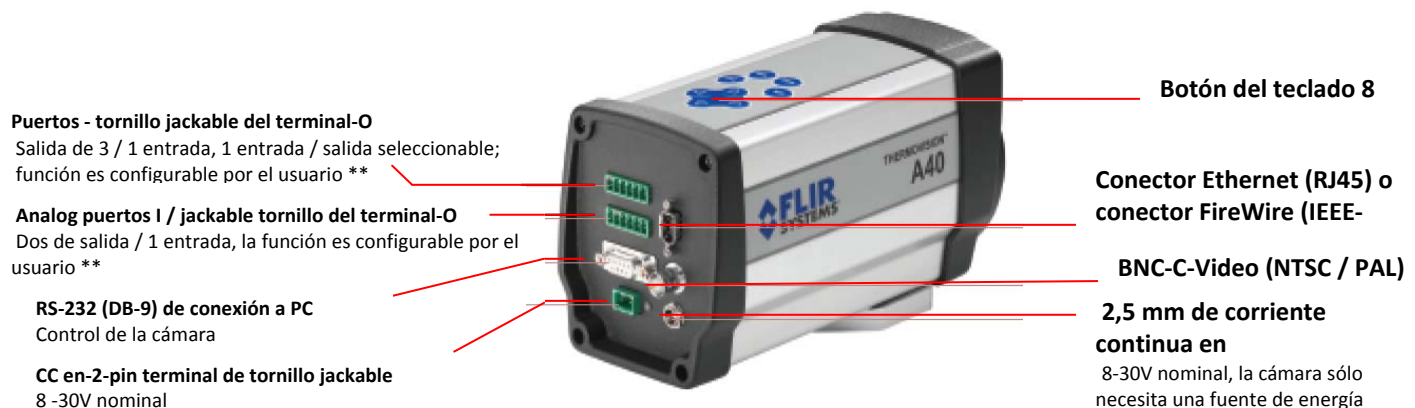
La cámara cuenta con amplias opciones de conectividad, ya que está disponible con un puerto FireWire o RJ-45 Ethernet. Cada cámara en red A40M puede estar equipada con su propia dirección IP lo que le permite empezar de forma independiente a través de su conexión. Esta red proporciona acceso instantáneo a imágenes térmicas A40M por cualquier usuario autorizado a través de la LAN, WAN o Internet. La cámara se puede configurar a través de la red, o con una presión suave en el botón interfaz.

Las características de la cámara A40M permiten conectar y usar el dispositivo una vez que éste esté conectado al ordenador sin tener que configurarlo. Ya que basta con conectar la cámara a un monitor estándar e inmediatamente producirá imágenes térmicas radiométricas de alta calidad, en tiempo real mostrando con precisión patrones de calor y anomalías térmicas.

La cámara Thermo-Vision™ A40-M está construida para funcionar sin vigilancia durante largos períodos en cualquier tipo de ambiente. Tiene un diseño

compacto, robusto y de peso ligero. Permiten que sea montada en lugares remotos, es magnífica para la recolección de datos.

### CÁMARA TERMOGRÁFICA



\* Todos los conecte con el estándar incorporado en la lente de 24 °

\*\* Consulte la tabla de configuración anterior

Figura 15. Cámara termográfica.

Rendimiento de las imágenes	
<b>Campo de visión/ distancia mínima de enfoque</b>	24 ° x 18 ° / 0,3 m
<b>Tipo de detector</b>	matriz de plano focal (FPA) sin refrigeración microbolómetro
<b>Rango espectral</b>	7.5 a 13 micras
<b>La resolución espacial (IFOV)</b>	1,3 mrad
<b>Sensibilidad @ 50/60 Hz</b>	0,08 ° C a 30 ° C
<b>Centrándose</b>	Construido en motor de enfoque
Imagen de Presentación	
<b>FireWire / Ethernet de salida</b>	8/16-bit blanco y negro y color de 8 bits
<b>Salida de vídeo</b>	RS170 EIA / NTSC o CCIR / vídeo compuesto PAL
Medición	
<b>Rangos de temperatura</b>	Rango 1: -40 ° C a +120 ° C (-40 a +248 ° F) Rango 2: 0 ° C a 500 ° C (32 a 932 ° F) Opcional: hasta 1500 ° C (2.732 ° F) Opcional: hasta 2000 ° C (3.632 ° F)



## Evaluación de un nuevo panel radiante altamente eficiente como sistema de calefacción para invernaderos

### Material y métodos

<b>Precisión (% de la lectura)</b>	$\pm 2^{\circ} \text{C}$ o $\pm 2\%$
<b>Modos de medición</b>	Spot, Área, Diferencia
<b>Corrección automática de la emisividad</b>	Variable de 0,1 a 1,0
<b>Configuración individual de la emisividad</b>	De libre configuración
<b>Corrección de la medición</b>	Refleja, la distancia, la humedad relativa ambiente, la óptica externa. Automática, basada en la entrada del usuario
<b>Complementario Lentes *</b>	
<b>Campo de visión / min. la distancia de enfoque</b>	7 ° Telescopio (7 ° x 5,3 ° / 4m) 12 ° Telescopio (12 ° x 9 ° / 1,2 m) 45 ° gran angular (45 ° x 34 ° / 0,1 m) 80 ° gran angular (80 ° x 60 ° / 0,1 m) Primer plano: 64 / 150 mm (FOV = 64 x 48 mm a 150 mm); 34/80 mm (FOV = 34 x 25 mm a 80 mm) Macro: de 50 micras (14,3 a 18,7 mm de foco; FOV = 14,3 x 10,8 mm a 14,3 mm; FOV = 15,1 x 11,2 mm a 18,7 mm; IFOV = 45 micras, con 14.3 mm, 47 micras, con 18.7 mm)
<b>Lente de reconocimiento</b>	Reconocimiento automático de la lente y correcciones de medición
<b>Fuente de alimentación</b>	
<b>AC operación</b>	Adaptador de CA 110/220 VAC, 50/60 Hz (Incluido)
<b>DC operación</b>	-30V nominal 8, <6W
<b>Medio Ambiente</b>	
<b>Rango de temperatura</b>	- 15 ° C a +50 ° C (5 ° F a 122 ° F)
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-40 ° C a +70 ° C (-40 ° F a 158 ° F)
<b>Humedad</b>	De funcionamiento y almacenamiento 10% a 95%, sin condensación
<b>Encapsulación</b>	IP 40 (Determinado por el tipo de conector)
<b>Choque</b>	Operativo: 25G, IEC 68-2-29
<b>Vibraciones</b>	Operativo: 2G, IEC 68-2-6
<b>Características físicas</b>	
<b>Peso</b>	1,4 kg (3,0 libras)



<b>Tamaño</b>	207mm x 92mm x 109mm (8.1 "x 3.6" x 4.3 ")
<b>De montaje del trípode</b>	1 / 4 "- 20

Tabla 14. Características de la cámara termográfica.



#### **4.1.4. Sensores de contacto.**

Para comprobar que las temperaturas registradas por la cámara eran reales, se colocaron una serie de sensores ubicados en el haz y envés de las hojas. Las sondas de contacto utilizadas eran del modelo SR –TFH-DISC y la empresa fabricante es Desin Instrument, S.A., emplazada en Barcelona (España). A continuación describiremos sus características.

Los sensores electrónicos están diseñados para la medida de la temperatura absoluta de las hojas. Para una correcta medida de la temperatura existen dos requisitos básicos: una mínima alteración sobre la temperatura de la hoja y un máximo contacto térmico entre la hoja y el sensor.

En cuanto a los datos obtenidos a partir de los sensores se precisó de un programa informático específico llamado ad hoc.

Precisión:  $\pm 0.4^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}$

Rango: 0-  $150^{\circ}\text{C}$ .

### 4.1.5. Registradores autónomos de temperatura.

También contamos con un par de hobos ubicados en el interior de los plantas para comprobar la temperatura ambiente.

El modelo es HOB0® Pro Temp-HR U23-001 de la marca Onset. Podemos definir entre sus características lo siguiente:



Figura 16. Hobos.

- Carcasa Intemperie para utilización en campo y entornos de alta condensación
- Alta Precisión
- Sensor HR reemplazable por el usuario, lo que permite una respuesta más rápida a la recuperación en condiciones de condensación
- Sensores externos de reducido diámetro para instalación en espacios reducidos
- Puerto USB Óptico para transferir los datos de forma rápida y segura
- Transportador [HOB0 Waterproof Shuttle](#) para manejo y recuperación de datos en campo

Memoria:	42,000 medidas
Intervalo de medida:	1 segundo a 18 horas Intervalos fijos o intervalos múltiples de registro de datos, con hasta 8 intervalos de medida y duraciones definidos por el usuario.
Precisión de Reloj:	1 minuto/mes a 25°C
Vida de la Batería:	3 años (típico) – Batería de Litio 3.6 Volt 1/2 AA intercambiable

Tabla 15. Características hobos.





El software que se requiere HOBOWare y una Estación Base Óptica BASE-U-4 con acoplador para manejar el HOBO Pro v2.

Con todos estos aparatos justificamos que las medidas tomadas van a ser correctas.

### 4.1.6. ThermaCAM<sup>TM</sup> Researcher Pro 2.8 S.

La utilización de la cámara es mediante un software especializado facilitado por el fabricante, ThermaCAM<sup>TM</sup> Researcher Pro 2.8 SR-3, por tanto describiremos cuáles son sus particularidades:

El software ThermaCAM<sup>TM</sup> Researcher Pro 2.8 SR-3, es flexible, el almacenamiento digital tiene un gran alcance, medición y análisis, el sistema permite mostrar en tiempo real los resultados. El programa recoge los datos directamente de la cámara a una velocidad de 60 fotogramas por segundo a través de la conexión de un FireWire IEEE 1394 de alta velocidad. Esto es ideal para el análisis de la dinámica de objetos y la velocidad térmica de los eventos. El software presenta gráficos en tiempo real, post-análisis y las necesidades de investigación.

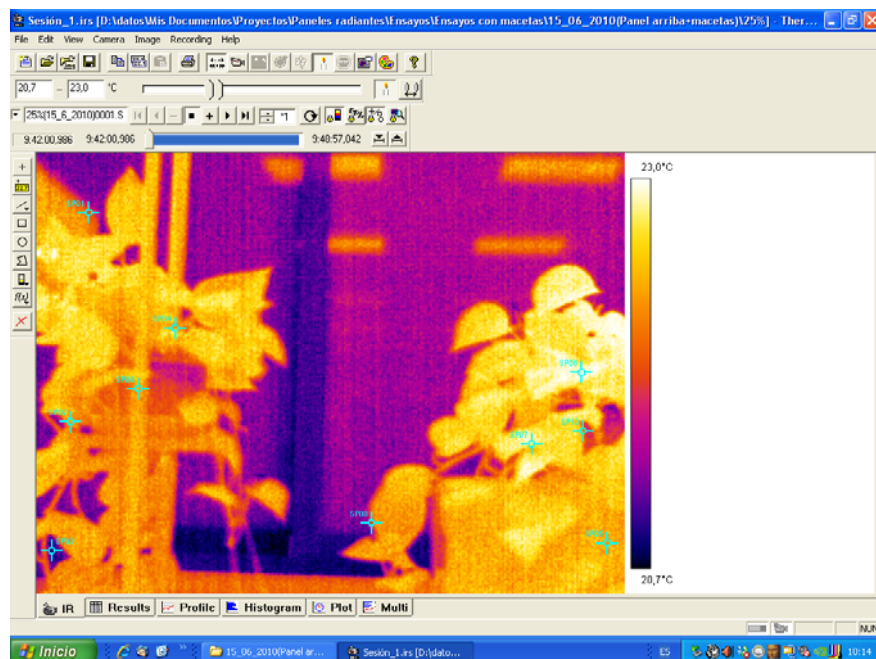


Figura 17. Pantalla principal del ThermaCAMTN Pro 2.8S.

En la figura17, observando la imagen IR, destacamos como se va formando mediante una escala de colores, cada uno asociado a una temperatura. Siendo blanco la máxima temperatura de la imagen y negro la mínima.

A continuación se describirán los ensayos realizados:



El primer ensayo que realizamos fue la evaluación de los dos paneles independientemente y conjuntamente, tanto con y sin regulación, para constatar los datos facilitados por el fabricante. En los ensayos con regulación se seleccionó en el potenciómetro el porcentaje de transferencia térmica deseado que corresponde al 25%, 50%, 75% y 100%, ensayos de 400s cada uno, para cada potencia.

El software se configuró de tal manera que los videos fueran de un tiempo estimado de 400s, además estaban compuestos de 400 fotogramas térmicos. Gracias al programa nos facilitaba la opción de ubicar puntos, líneas y superficies en cada ensayo, con el fin de observar las variaciones entre los elementos a lo largo de la grabación.

En este trabajo sólo se muestran la colocación de puntos singulares, con el objetivo de que los ensayos representaran las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo de exposición a la fuente radiante.

En las imágenes se muestran los mismos puntos que nosotros hemos utilizado en el tratamiento de datos, aunque en los ensayos realizados con las macetas hemos cogido una media de 8 puntos.

En todos los ensayos, la cámara termográfica permanecía fija sobre un trípode a lo largo del ensayo, dependiendo del campo de visión, a una distancia u otra.

### 4.1.7. Diseño experimental.

En el 2° ensayo, se colocaron dos macetas de pequeño porte de la especie *Epipremmun aureum*. Las macetas estaban dispuestas una detrás de la otra con el fin de comprobar el grado de sombreado al que estaba sometida la maceta de detrás. Se realizaron las siguientes pruebas:

1. Panel inferior con regulación.
2. Panel superior con regulación.
3. Dos paneles con regulación.

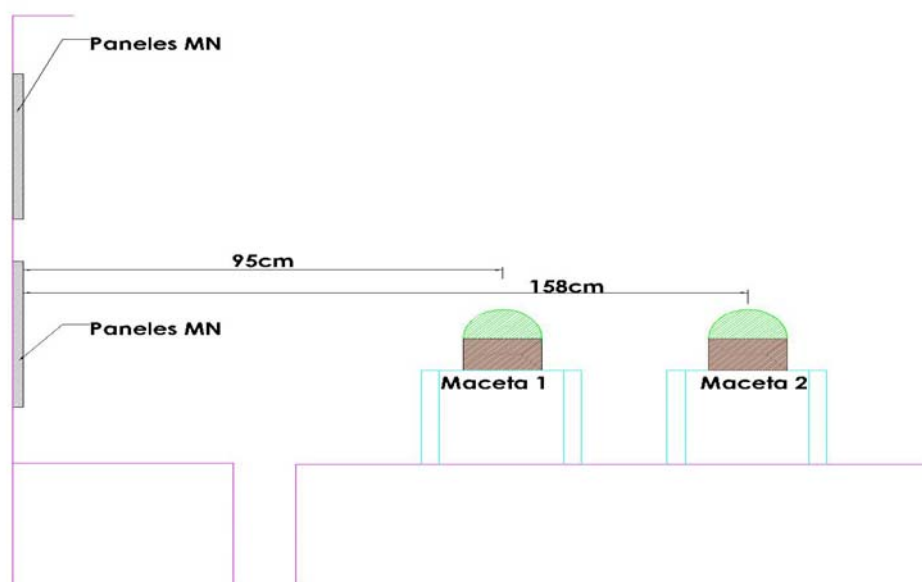


Figura 18. Esquema de trabajo ensayo n° 2.

En el 3° ensayo, se colocaron las macetas en vertical, cada una situada justo enfrente de cada panel, separadas entre sí 60cm y a 95cm de estos. Se realizaron las siguientes pruebas:

1. Panel inferior con regulación.
2. Panel superior con regulación.
3. Dos paneles con regulación.

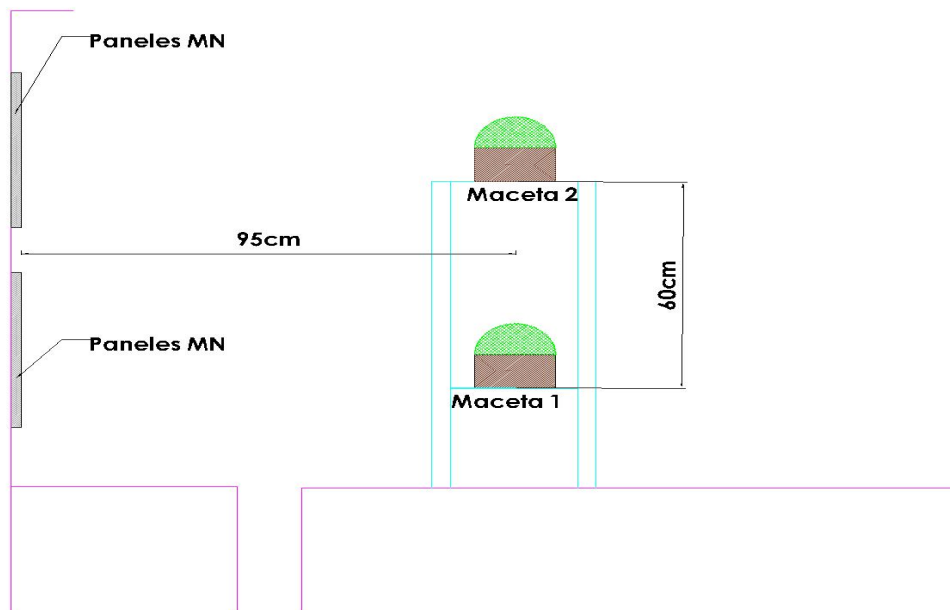


Figura 19. Esquema de trabajo ensayo nº 3.

En el 4º ensayo, se colocaron las macetas en vertical, cada una situada justo enfrente de cada panel, separadas entre sí 60cm y a 158cm de estos. Se realizaron las siguientes pruebas:

1. Panel inferior con regulación.
2. Panel superior con regulación.
3. Dos paneles con regulación.

En el 5º ensayo, se colocaron las macetas en vertical, cada una situada justo enfrente de cada panel, separadas entre sí 60cm y a 220cm de estos. Se realizaron las siguientes pruebas:

1. Panel inferior con regulación.
2. Panel superior con regulación.
3. Dos paneles con regulación.

### 4.1.8. Polímetros.

Es el instrumento de medida que se emplea para la medida de las magnitudes eléctricas. El polímetro utilizado fue digital, en los que la medición está indicada directamente por el valor numérico en una pantalla. Se hizo uso de ellos, debido a su precisión, la comodidad de obtener medidas digitales, y el hecho de que se puede usar tanto para tensiones, intensidades y potencias. Ya que éste hace la función de voltímetro, amperímetro y vatímetro.

A partir de las medidas de intensidad, tensión y potencia de los polímetros se puede conocer cuál es el resultado más ideal para la elección de la posición. Ya que nos permite evaluar de forma más precisa y eficiente los paneles.

### DESCRIPCION POLÍMETRO DIGITAL

En un **POLÍMETRO DIGITAL** podemos distinguir las siguientes partes más importantes:

- **DISPLAY:** Pantalla de cristal liquido donde aparecen los dígitos ( $3\frac{1}{2}$ ,  $4\frac{1}{2}$ ), resultado de la medida que se esté realizando.
- **ON/OFF:** Interruptor de encendido/apagado del



Figura 20. Polímetro.

- **SELECTOR DE ESCALAS:** Ruleta giratoria con la que elegimos el tipo de magnitud que queremos medir (óhmios, DCV, ACV, ACA, DCA, hFE, T<sup>a</sup>), y el rango o alcance máximo de la medida (20 M, 200 mA, 2 mV).
- **BORNES DE CONEXIÓN:** Bornes en los cuales se han de conectar las clavijas de las puntas de prueba. Según el tipo de medida que se vaya a realizar deberán colocarse en una posición u otra.



- **PUNTAS DE PRUEBA:** Son los elementos que interconectan el polímetro con el componente o circuito a medir. Disponen de una punta metálica montada sobre un mango aislante de la electricidad y se conectan a través de un cable al polímetro por medio de una clavija. Uno es de color rojo, que se suele emplear para la polaridad positiva, y el otro de color negro para la negativa, aunque, como veremos, en algunos casos la polaridad es indiferente.



## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**



Trabajando con los datos experimentales recogidos a lo largo de todos los ensayos, definidos anteriormente, se obtienen los siguientes resultados de cada uno de ellos.

### 5.1. PANELES.

En este primer apartado evaluaremos los paneles, para comprobar si su funcionamiento es correcto. Para ello, compararemos los dos paneles de forma individual y conjunta.

#### 5.1.1. PANEL DE ABAJO Vs. PANEL DE ARRIBA.

Estudiaremos el comportamiento del panel de arriba y el de abajo funcionando independientemente, para demostrar que los dos paneles aproximadamente tienen un mismo consumo. Además constatar que la tensión e intensidad también son similares en ambos.

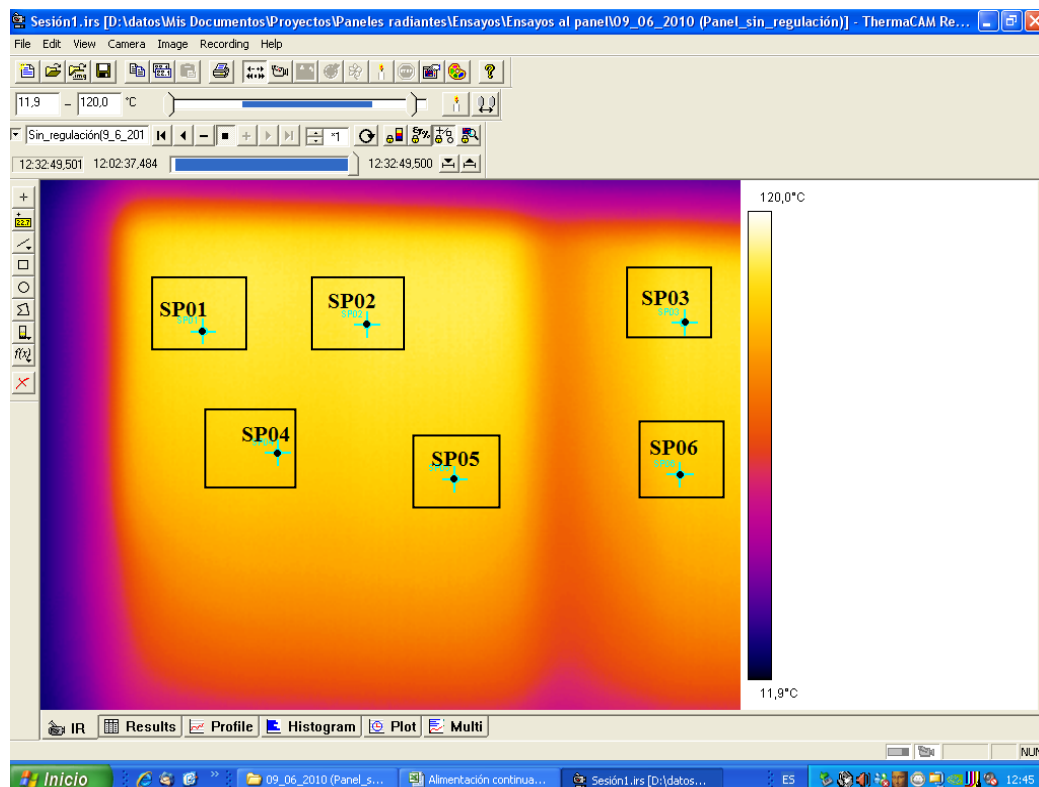


Figura 21. Imagen termográfica, ensayo panel de abajo.

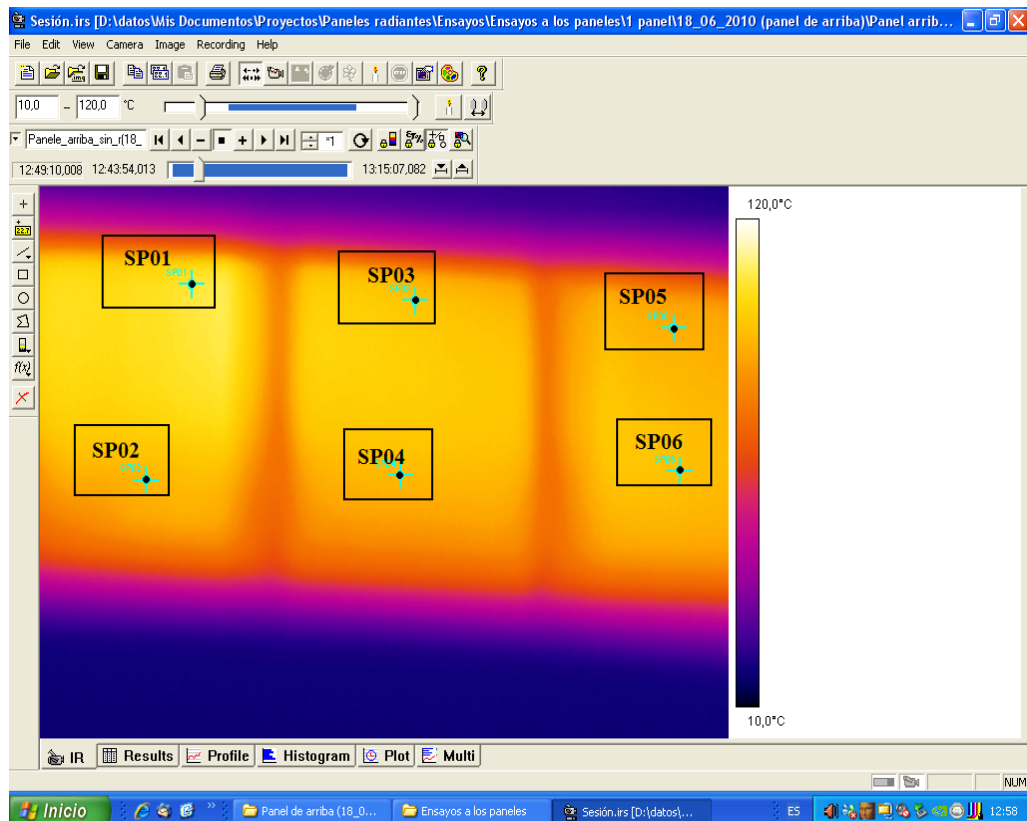


Figura 22. Imagen termográfica, ensayo panel de arriba.

De estas imágenes se han tomado seis puntos representativos del panel: SP01, SP02, SP03, SP04, SP05, SP06. Los cuales estudiaremos con una alimentación regulada y sin regulación.

A continuación examinaremos su comportamiento.

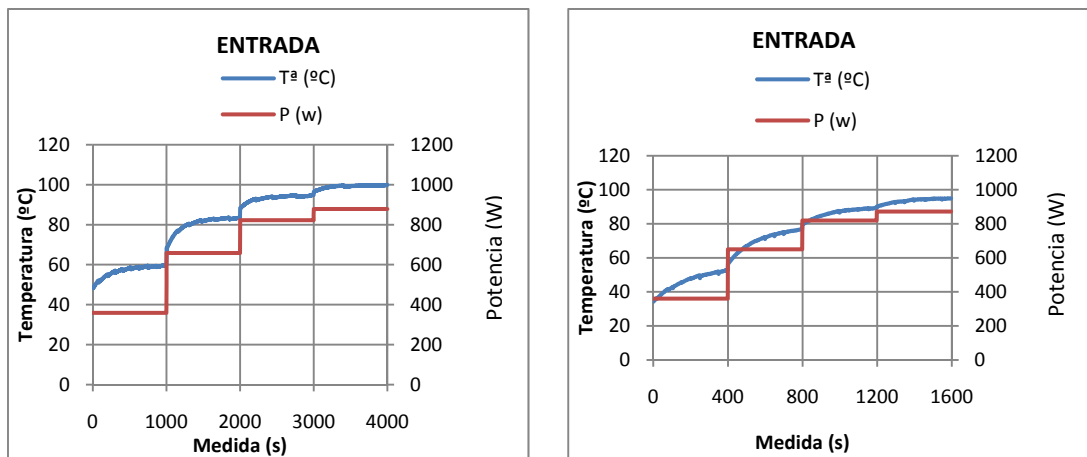
### 5.1.1.1. ALIMENTACIÓN REGULADA.

Estudiaremos cada panel con una alimentación regulada en cada una de las potencias seleccionadas en orden ascendente, 25%, 50%, 75%, 100%.

### PANEL DE ABAJO

### PANEL DE ARRIBA

#### Potencia:

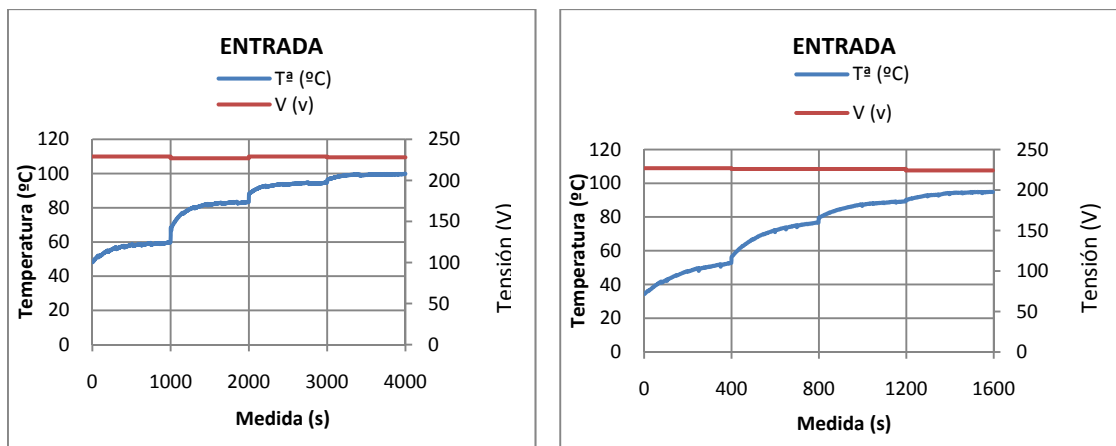


Gráfica 1. Panel de abajo con alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.

Gráfica 2. Panel de arriba con alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.

Al observar los dos paneles podemos distinguir que para iguales potencias se alcanzan semejantes temperaturas, o sea, actúan de manera similar. Aunque, el panel de abajo al tomar 1000 medidas, de cada potencia, alcanza unas temperaturas un poco más elevadas, pero no es un dato relevante, a tener en cuenta. Además, destacamos que el panel se comporta de una manera eficiente, ya que el tiempo de acción reacción es mínimo. Esto quiere decir, que a los 6 minutos con una potencia de 359W existe un incremento térmico de 9,16 °C en el panel de abajo, mientras que en el panel de arriba con un tiempo de 4,6 minutos existe una variación de temperatura de 16 °C. El incremento térmico en el panel de arriba es mayor, ya que la temperatura de inicio es más baja. También podemos destacar que al seleccionar una potencia determinada en el panel se produce un incremento térmico ascendente hasta el momento de su estabilización térmica. Sin embargo, el panel de arriba alcanza menos temperatura que el de abajo, puede ser debido al proceso de fabricación.

### Tensión:

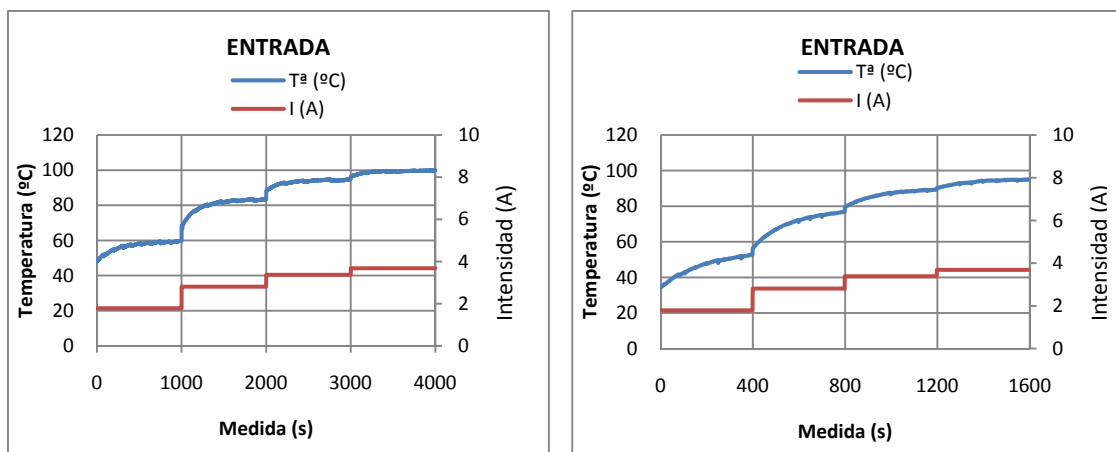


Gráfica 3. Panel de abajo con alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.

Gráfica 4. Panel de arriba con alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.

Podemos verificar que los paneles están conectados a una fuente de 220V.

### Intensidad:



Gráfica 5. Panel de abajo con alimentación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la intensidad.

Gráfica 6. Panel de arriba con alimentación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la intensidad.

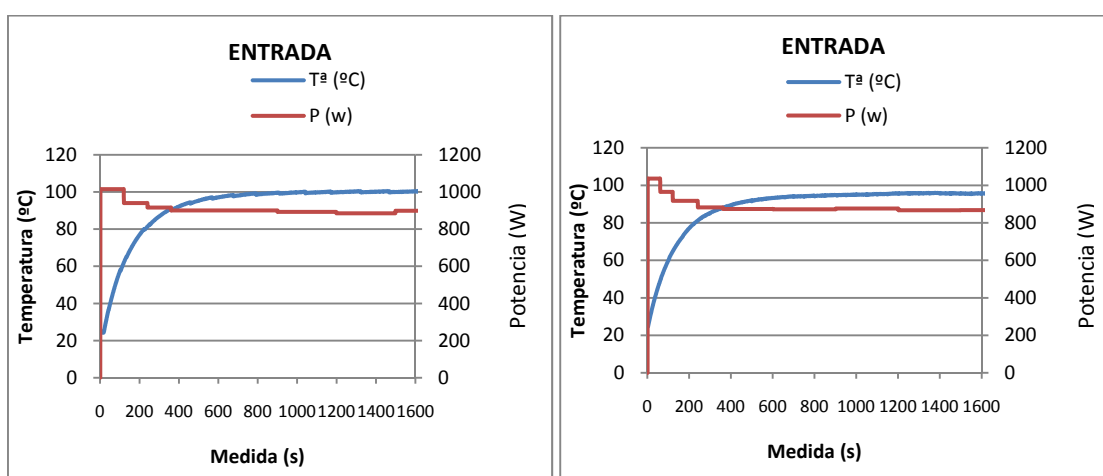
Observamos que en los dos casos la intensidad va aumentando conforme se incrementa la temperatura.

### 5.1.1.2. SIN ALIMENTACIÓN REGULADA.

#### PANEL DE ABAJO

#### PANEL DE ARRIBA

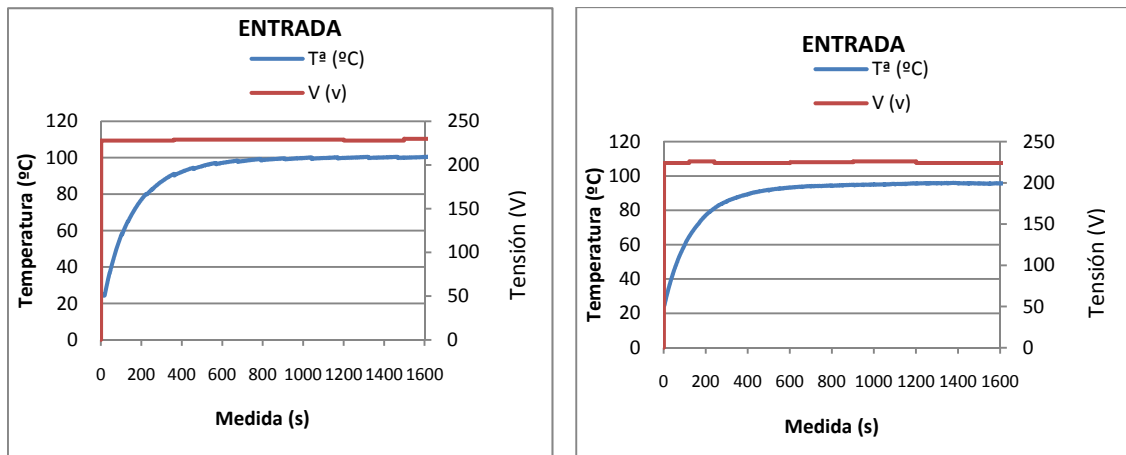
#### Potencia:



Gráfica 7. Panel de abajo sin alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.

Gráfica 8. Panel de arriba sin alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.

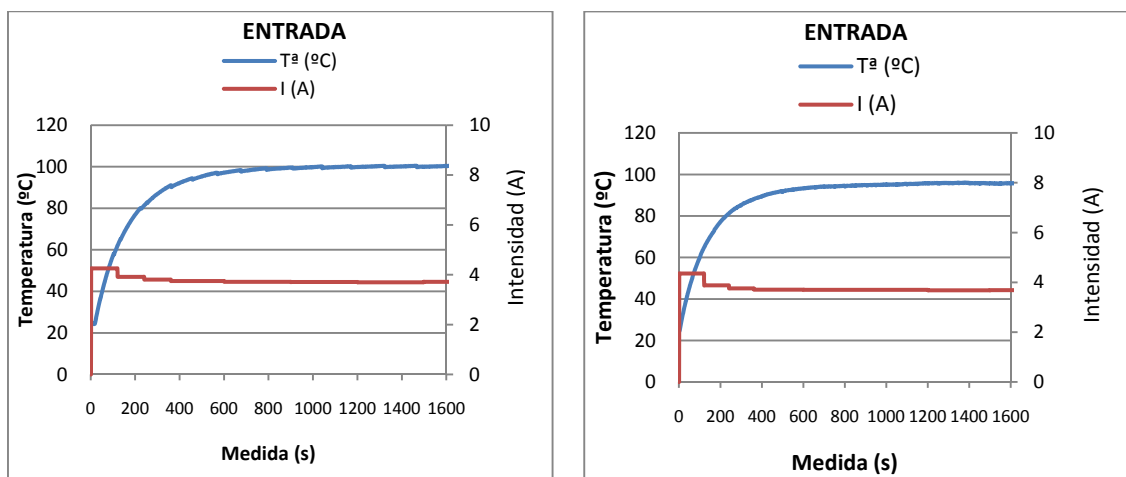
### Tensión:



Gráfica 9. Panel de abajo sin alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.

Gráfica 10. Panel de arriba sin alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.

### Intensidad:



Gráfica 11. Panel de abajo sin alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.

Gráfica 12. Panel de arriba sin alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.

En los ensayos sin alimentación regulada se distingue que ambos paneles tienen un desarrollo similar. El panel al no estar sujeto a una potencia determinada la

temperatura que alcanza justo en el instante inicial de su conexión es elevada, ésta se estabiliza al llegar al punto máximo. En cuanto a la potencia, podemos decir que le ocurre lo mismo que a la temperatura. La tensión en todo momento se mantiene constante a 220v con una frecuencia de 50Hz. Al mismo tiempo la intensidad es directamente proporcional a la potencia.

Deducimos que los dos paneles funcionan correctamente ya que los datos facilitados por el fabricante se asemejan a los nuestros.

### 5.1.2. DOS PANELES Vs. UN SOLO PANEL.

Puesto que, ya sabemos que los paneles funcionan correctamente además de igual, a continuación expondremos los datos obtenidos de los dos paneles conectados simultáneamente con respecto a un solo panel. Para así poder justificar que los consumos e intensidades son el doble en los dos paneles con respecto a un único panel y la tensión se mantiene constante en todo el intervalo.

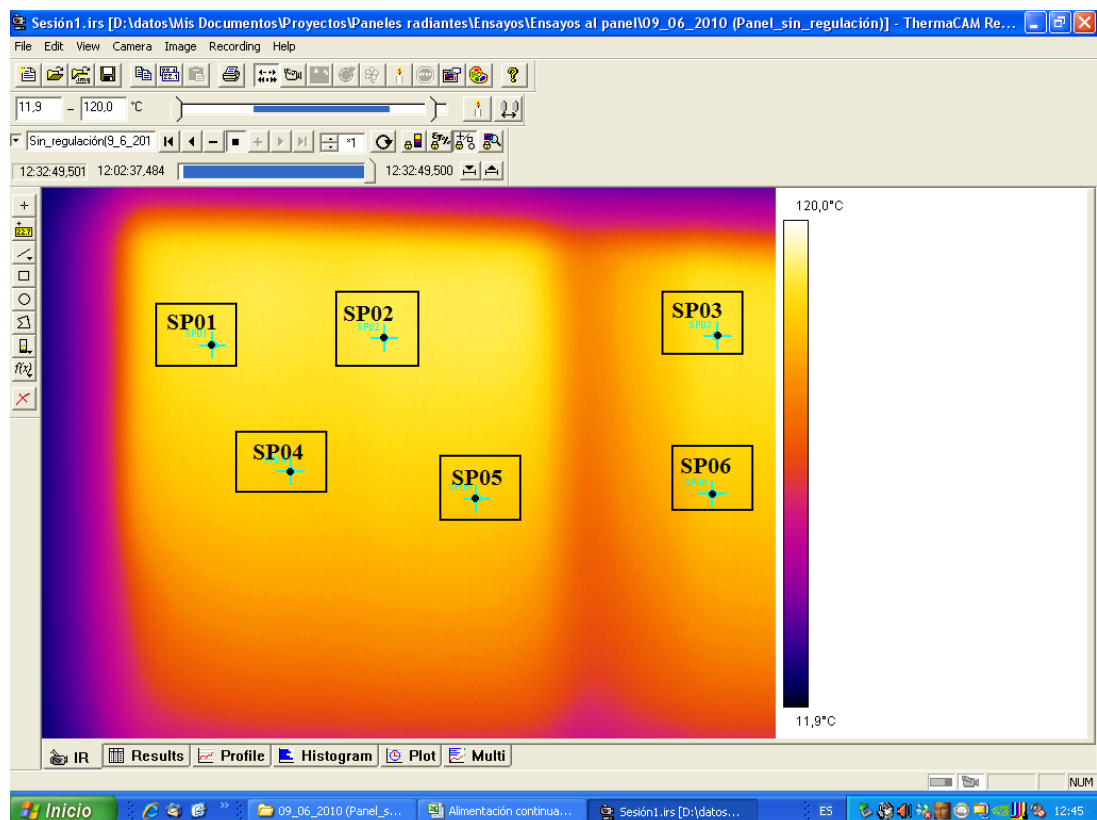


Figura 23. Imagen termográfica, ensayo un panel.

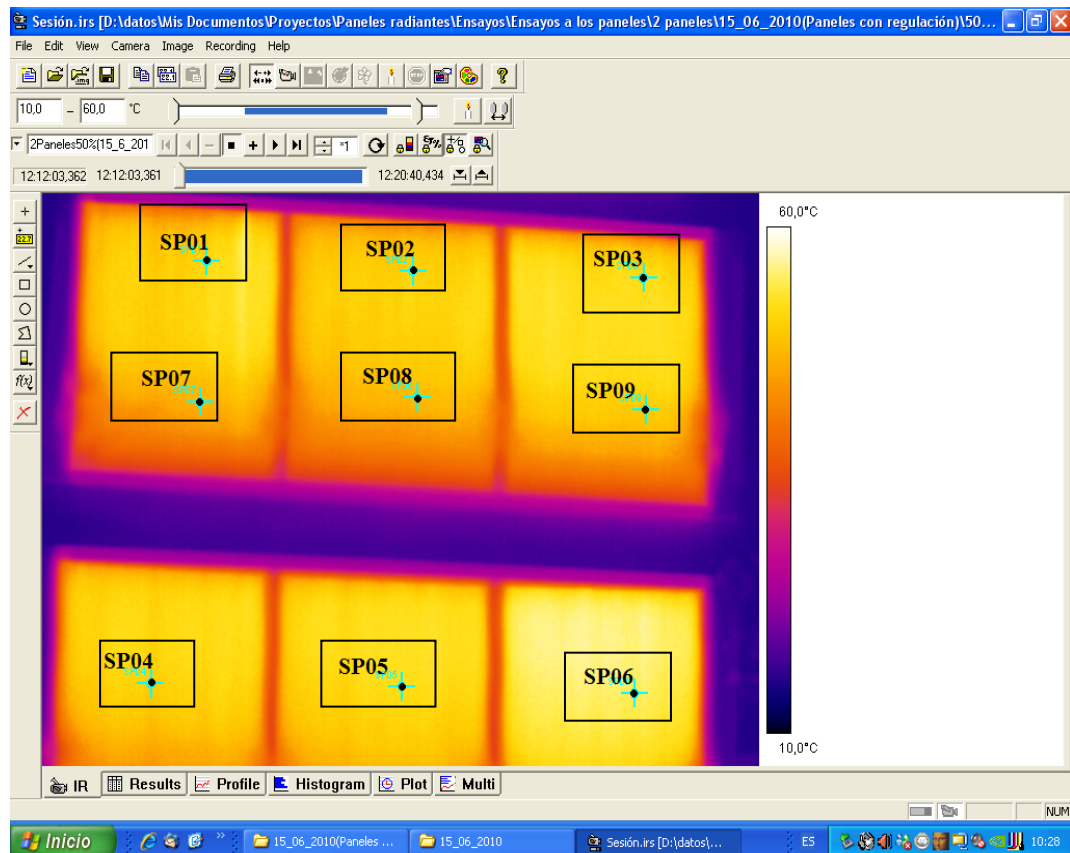


Figura 24. Imagen termográfica, ensayo ambos paneles.

Para ello analizaremos los paneles en los mismos aspectos que en el apartado anterior. De cada panel tomamos una serie de puntos para poder evaluar su funcionamiento.

Panel de abajo: SP01, SP02, SP03, SP04, SP05, SP06.

Ambos paneles conectados: SP01, SP02, SP03, SP04, SP05, SP06, SP07, SP08, SP09.

### 5.1.2.1. ALIMENTACIÓN REGULADA.

A continuación, compararemos el consumo de un solo panel en relación a los dos paneles conectados. Para ello estudiaremos los paneles con una alimentación regulada en cada una de las potencias seleccionadas en orden ascendente, 25%, 50%, 75%, 100%.

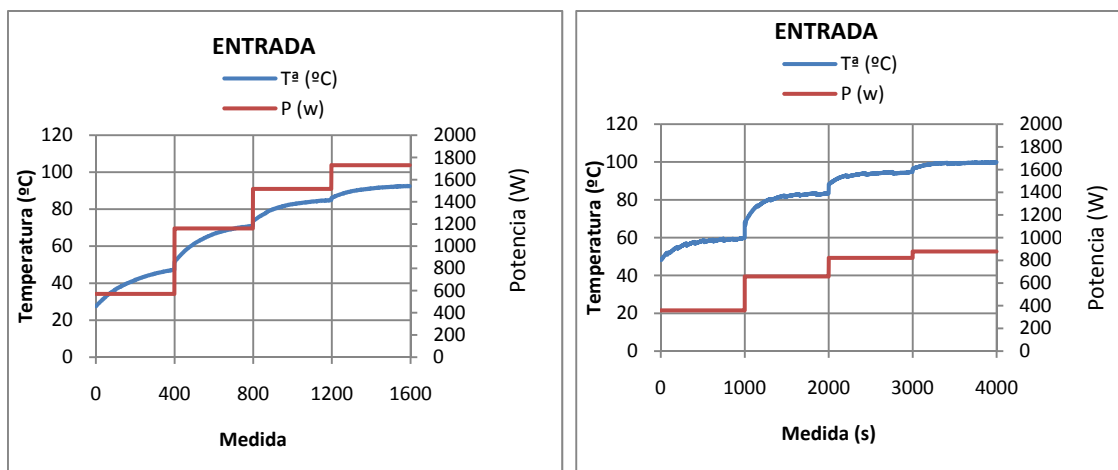
Con los valores obtenidos de cada ensayo se constituirán las siguientes gráficas.



### 2 PANELES

### 1 PANEL (SÓLO EL DE ABAJO)

#### Potencia:

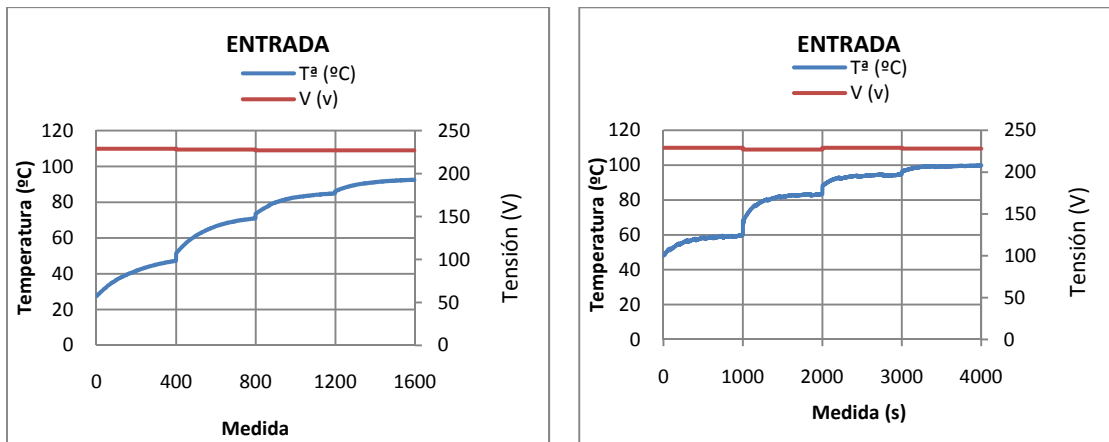


Gráfica 13. Dos paneles con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.

Gráfica 14. Un solo panel con alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.

Cabe destacar que la potencia consumida por los dos paneles conectados conjuntamente es realmente el doble que la de un único panel en funcionamiento. Con un solo panel se alcanza una potencia de casi 900 W y con los ambos paneles conectados la potencia lograda es aproximadamente de 1800 W. Además la tempertura media alcanzada es similar en ambos paneles. Verificamos que el funcionamiento es adecuado.

### Tensión:

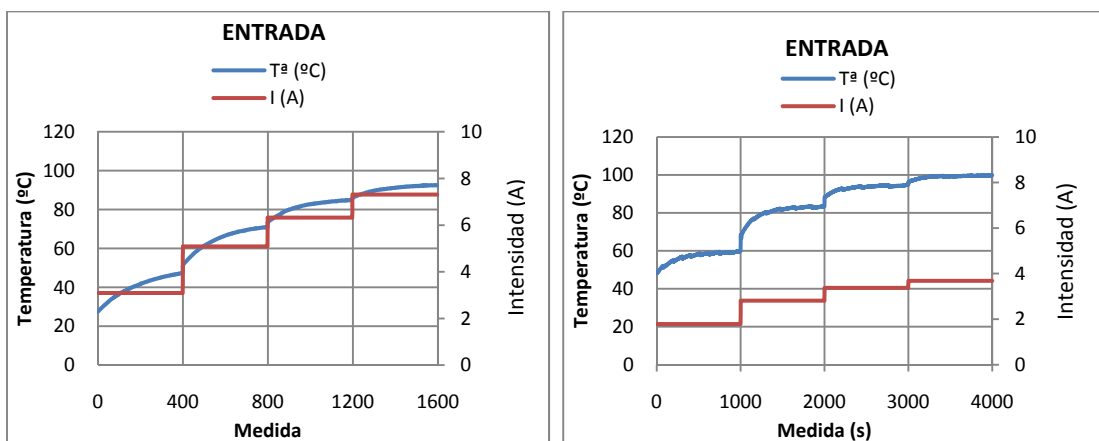


Gráfica 15. Dos paneles con alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.

Gráfica 16. Un solo panel con alimentación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la tensión.

Como en los ensayos los paneles están conectados a la misma fuente de alimentación, la tensión oscila entre los 220-230 V.

### Intensidad:



Gráfica 17. Dos paneles con alimentación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la intensidad.

Gráfica 18. Un solo panel con alimentación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la intensidad.

De modo que, ya sabemos que la intensidad es directamente proporcional a la potencia consumida. Así que, observamos en cada gráfica que la intensidad se va incrementando conforme se va aumentando la potencia en cada intervalo de tiempo. Al comparar la dos gráficas estimamos que cuando están conectados los dos paneles la intensidad es justo el doble que cuando está conectado un panel.

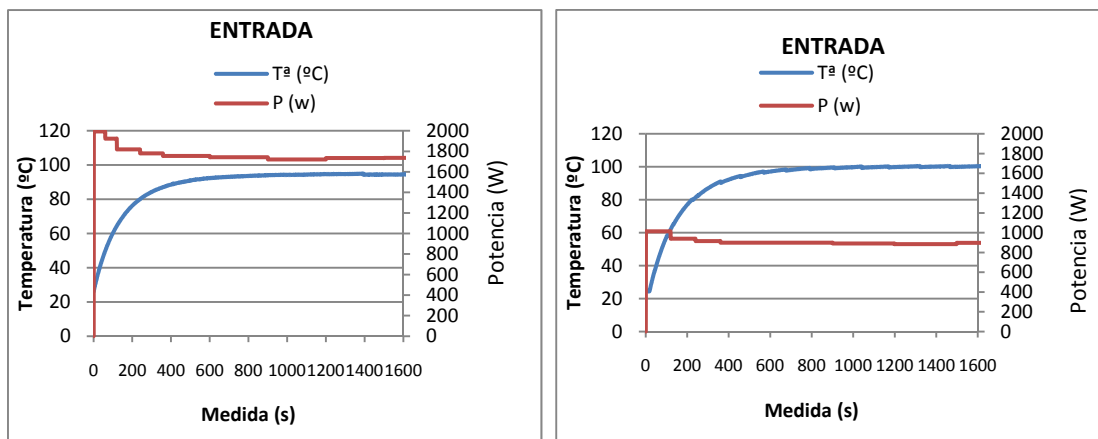
### 5.1.2.2. SIN ALIMENTACIÓN REGULADA.

Analizaremos en este apartado cuanto tiempo debe de transcurrir desde la conexión de los paneles a la fuente de alimentación hasta que éstos llegan a un equilibrio constante en la transmisión de la inercia térmica con respecto a la potencia alcanzada.

#### 2 PANELES

#### 1 PANEL (SÓLO EL DE ABAJO)

#### Potencia:



Gráfica 19. Dos paneles sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.

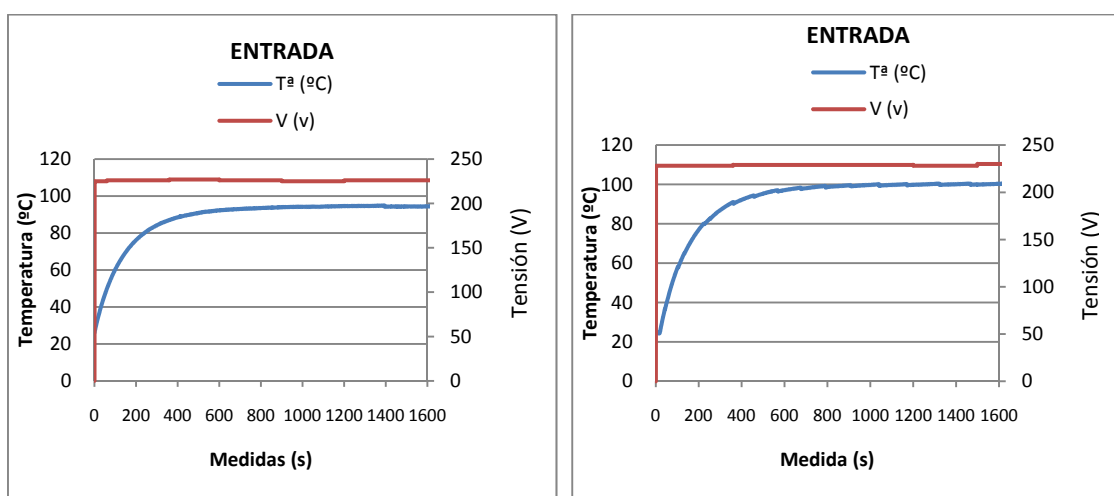
Gráfica 20. Un solo panel sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respecto a la potencia consumida en cada instante de tiempo.

Al comparar los dos paneles con respecto a un único panel se pueden destacar las siguientes semejanzas:

Primeramente matizamos su análogo comportamiento, ya que al conectar los paneles individual y conjuntamente a la fuente de alimentación se produce un incremento térmico de 70°C a los 6,7 minutos. Transcurrido ese tiempo los paneles se estabilizan al igual que la potencia, teniendo en la gráfica de la derecha un consumo del doble.

La temperatura alcanzada en ambos paneles conectados es ligeramente menor que la de un solo panel, no sabemos a que puede ser debido.

### Tensión:

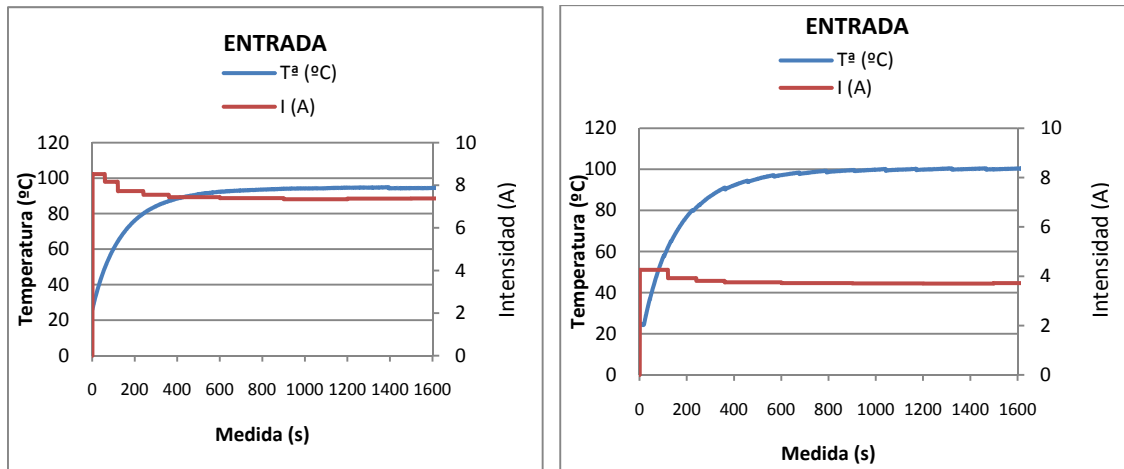


Gráfica 21. Dos paneles sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respesto a la tensión.

Gráfica 22. Un solo panel sin alimetación regulada, comparación de la temperatura media respesto a la tensión.

Respecto a la tensión se mantiene constante dutante el ensayo, oscila entre los 220-230V.

### Intensidad:



Gráfica 23. Dos paneles sin alimentación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la tensión.

Gráfica 24. Un solo panel sin alimentación regulada, comparación de la temperatura media con respecto a la tensión.

Referente a la intensidad, cabe destacar que en ambos ensayos, sin alimentación regulada, a los 6,7 minutos la intensidad se estabiliza y se mantiene constante hasta el final. La intensidad con los dos paneles conectados alcanza los 7,5 A y con un sólo panel oscila entre los 3,7 A.

La intensidad es directamente proporcional a la potencia seleccionada.

Por último, resaltar que con los dos paneles conjuntamente en funcionamiento el umbral de transmisión de energía calorífica es el doble que con un único panel, por ello los consumos e intensidad también lo son.

### 5.2. PLANTAS DELANTE Y DETRÁS.

En el siguiente ensayo se colocaron las dos plantas al mismo nivel, una delante de la otra con respecto al panel. La primera planta, la más cercana al panel, se situó a una distancia de 95cm y la segunda a 158cm. Con dicha posición se hicieron los ensayos pertinentes, los cuales eran: al panel de abajo; al panel de arriba y ambos funcionando al mismo tiempo.

#### 5.2.1. PANEL DE ABAJO.

Con este ensayo vamos a considerar las diferencias existentes entre la zona de sombreado respecto a la de máxima radiación. Los datos representados a continuación son los obtenidos en el ensayo con el panel de abajo, ya que en esta posición el panel se sitúa frente a las plantas.

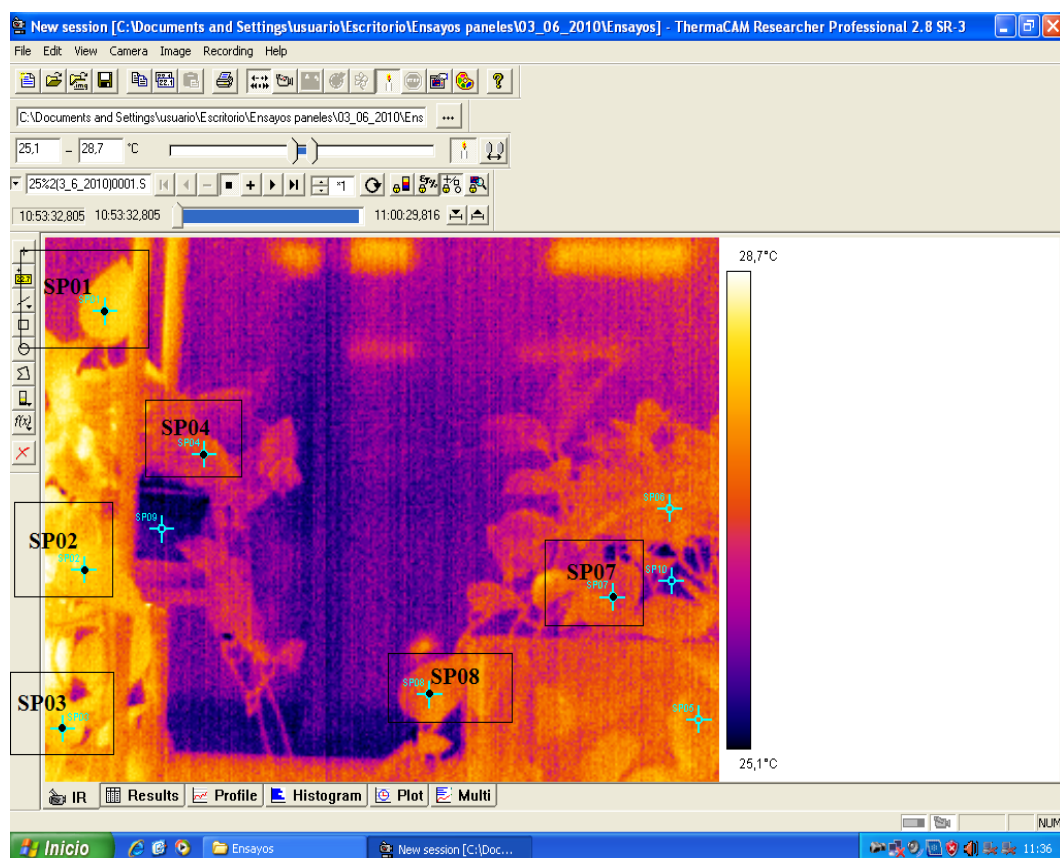


Figura 25. Imagen termográfica, ensayo nº2 panel de abajo.

### 5.2.1.1. INCREMENTOS DE TEMPERATURA.

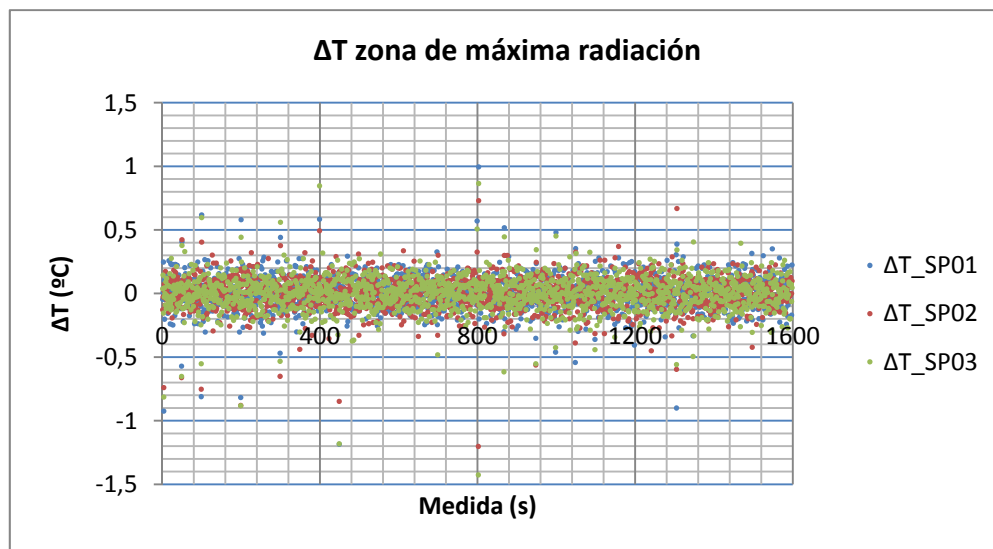
Estudiamos los incrementos de temperatura en ambas zonas. Para ello se tomaron 3 puntos representativos de cada una de ellas.

Puntos de la zona de máxima irradiación: SP01, SP02, SP03.

Puntos de la zona de sombreado: SP04, SP07, SP08.

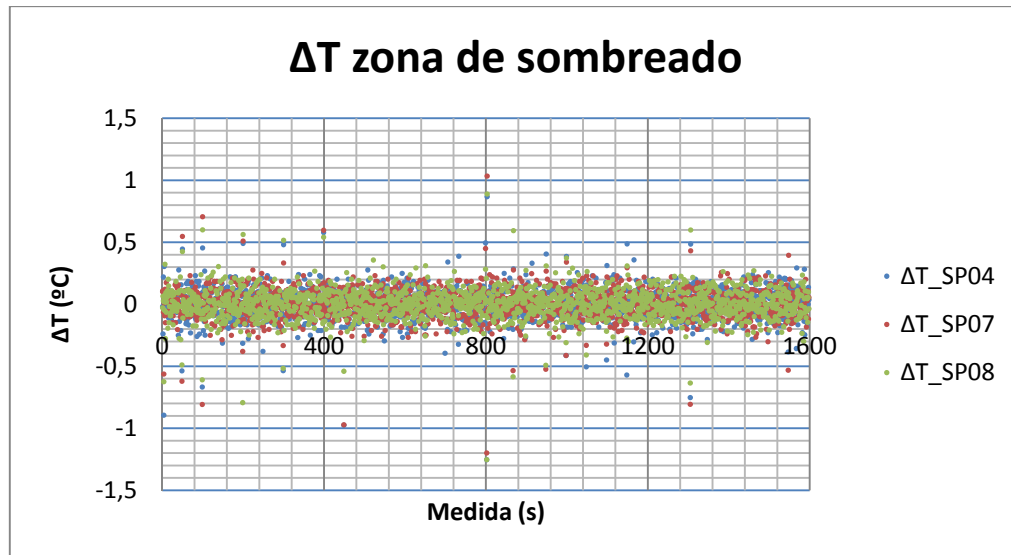
#### Ensayo completo:

##### ▪ Zona de máxima radiación:



Gráfica 25. Zona de máxima radiación, panel de abajo, plantas delante y detrás.

### ▪ Zona de sombreado:



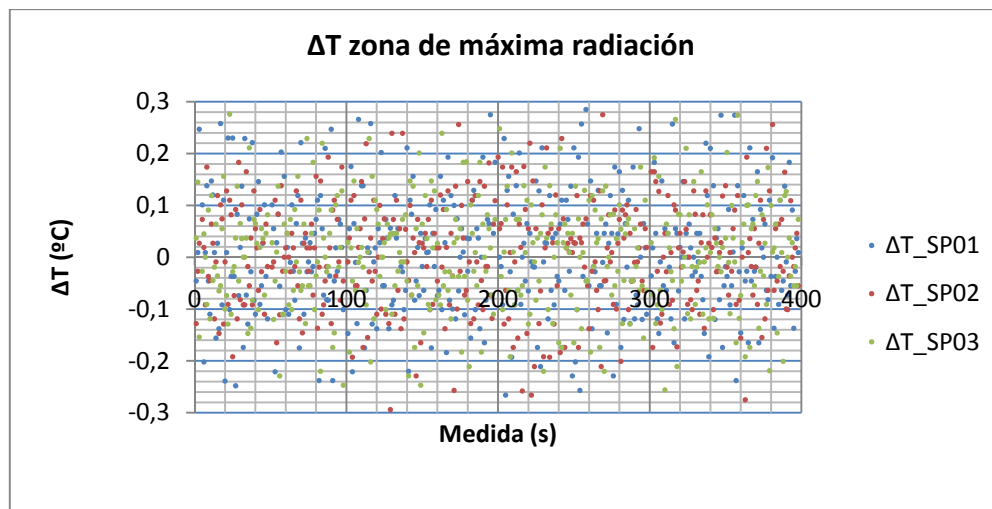
Gráfica 26. Zona de sombreado, panel de abajo, plantas delante y detrás.

### **Ensayo con la potencia al 25%:**

Para una mejor visualización de los incrementos de temperatura, nos centraremos en las primeras 400 medidas que se toman con la potencia al 25%, que es justo el instante inicial en el que se conecta el panel a la fuente de alimentación.

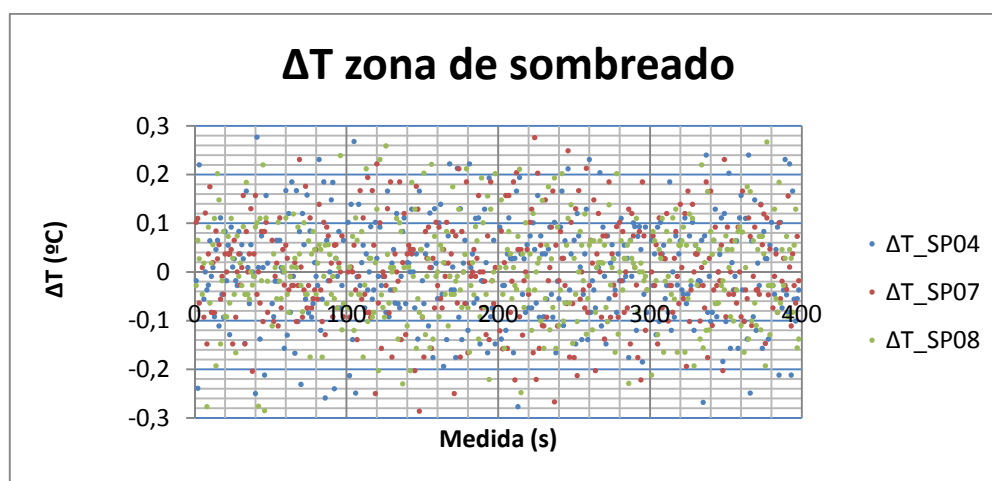


### ▪ Zona de máxima radiación:



Gráfica 27. Zona de máxima radiación, panel de abajo al 25%, plantas delante y detrás.

### ▪ Zona de sombreado:



Gráfica 28. Zona de sombreado, panel de abajo al 25%, plantas delante y detrás.

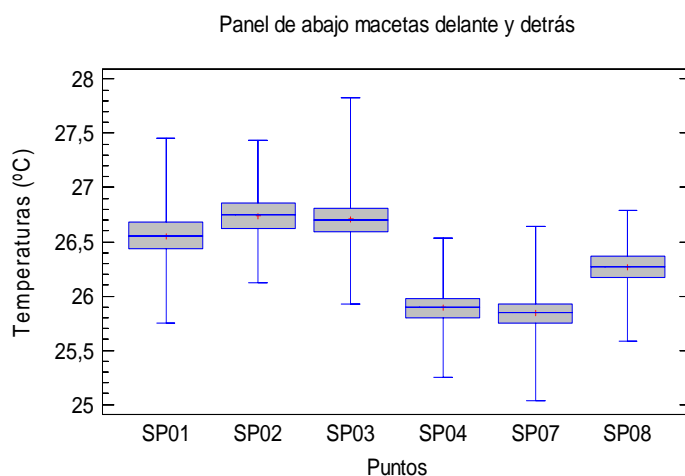
En ambas gráficas apreciamos que los puntos situados en la zona de máxima radiación y los ubicados en la zona de sombreado se encuentran dentro del mismo

intervalo (oscila entre -0,3 y 0,3). Sin embargo, en la zona de máxima radiación las temperaturas que se alcanzan son mayores, debido a que los incrementos térmicos están menos concentrados en torno al cero.

### 5.2.1.2. DIFERENCIAS TÉRMICAS ENTRE LA ZONA DE MÁXIMA RADIACIÓN Y SOMBREADO.

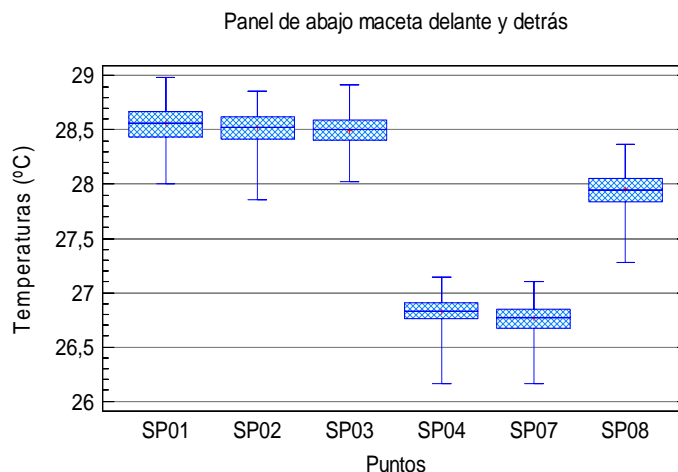
A continuación, expondremos las temperaturas que se alcanzan en cada punto, para ver las diferencias que se originan entre ambas zonas. Para ello, lo estudiaremos a una potencia mínima y máxima.

**Con una potencia de 359W, potenciómetro al 25%:**



Gráfica 29. Plantas delante y detrás con el panel de abajo, potenciómetro al 25%.

**Con una potencia de 883W, potenciómetro al 100%:**



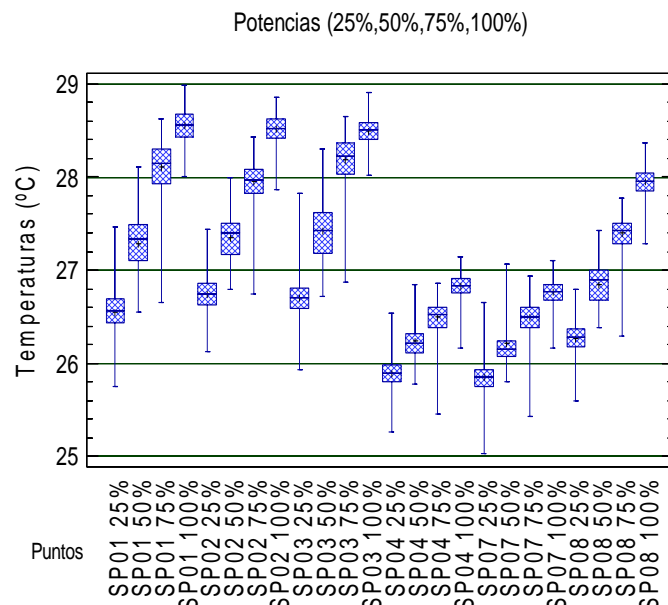
Gráfica 30. Plantas delante y detrás con el panel de abajo, potenciómetro al 100%.

En las gráficas (gráfica 29, 30) podemos apreciar claramente la zona de máxima radiación con respecto a la de sombreado, ya que los puntos SP01, SP02, SP03 alcanzan mayores temperaturas que los demás puntos SP04, SP07, SP08. Se puede identificar que existe una zona de sombreado, donde la transferencia térmica es obstaculizada por la primera planta. Esta zona, se ubica entre la planta delantera y trasera, puesto que SP04, SP07 y SP08 poseen menores valores térmicos, que se acentúan con la potencia máxima.

Además, también matizamos que a una potencia máxima (100%) (gráfica 30) la diferencia térmica entre la zona de máxima radiación y la de sombreado es más acusada que con una mínima potencia (25%) (gráfica 29).

Seguidamente representaremos los comportamientos de los distintos puntos tomados de la imagen térmica conforme va aumentando la potencia en el tiempo:

- 360W (25%).
- 667,8 W (50%).
- 822,8 W (75%).
- 880,8 W (100%).

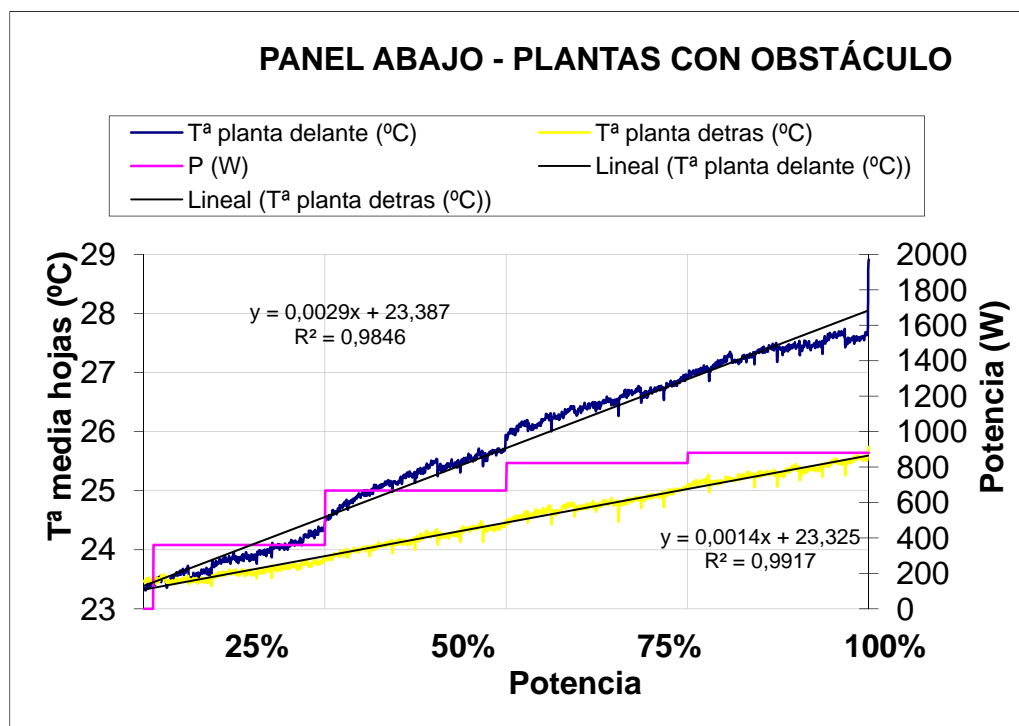


Gráfica 31. Puntos a distintas potencias, panel de abajo, plantas delante y detrás.

Consideramos de la siguiente gráfica (gráfica31) que las temperaturas van aumentando a lo largo del tiempo conforme se incrementa el consumo. Además, concluimos que la zona más cercana a los paneles alcanza antes el nivel óptimo que cualquier otra zona. Por el contrario, los puntos de la zona de sombreado para llegar a un nivel óptimo necesitarían aumentar la potencia, lo que conllevaría a problemas fisiológicos en la planta, debido al contraste térmico que se ocasionaría.

### 5.2.1.3. DIFERENCIAS TÉRMICAS ENTRE LA ZONA DE MÁXIMA RADIACIÓN Y SOMBREADO A DISTINTAS POTENCIAS.

A continuación veremos gráficamente las diferencias existentes entre ambas zonas, en función de la potencia.

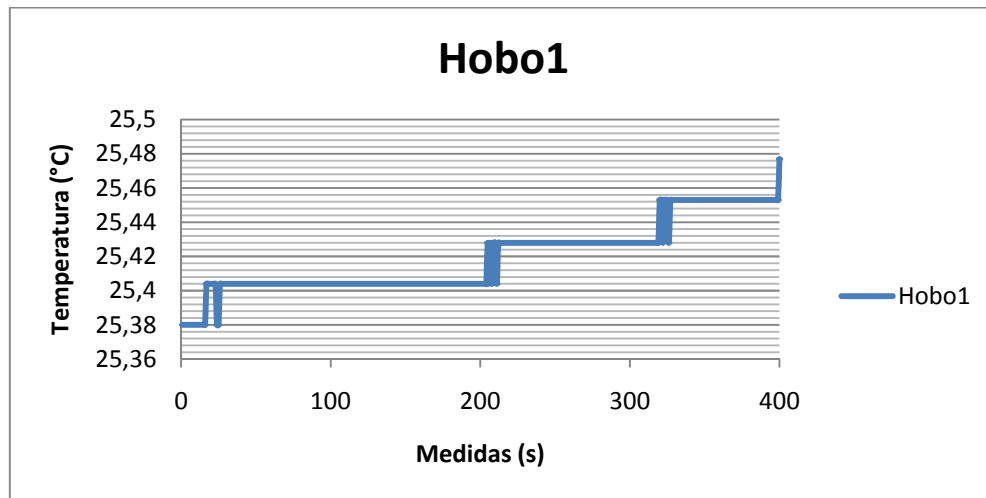


Gráfica 32. Diferencias térmicas entre ambas zonas, panel de abajo, plantas delante y detrás.

#### 5.2.1.4. REGISTRO DE LA TEMPERATURA RADIADA POR LOS PANELES A PARTIR DE LOS HOBOS Y SENSORES.

##### – **Hobos:**

Para comprobar que las temperaturas medidas con la cámara termográfica son correctas mostraremos los registros realizados por los hobos en los primeros 400 segundos con una potencia consumida de 359W.

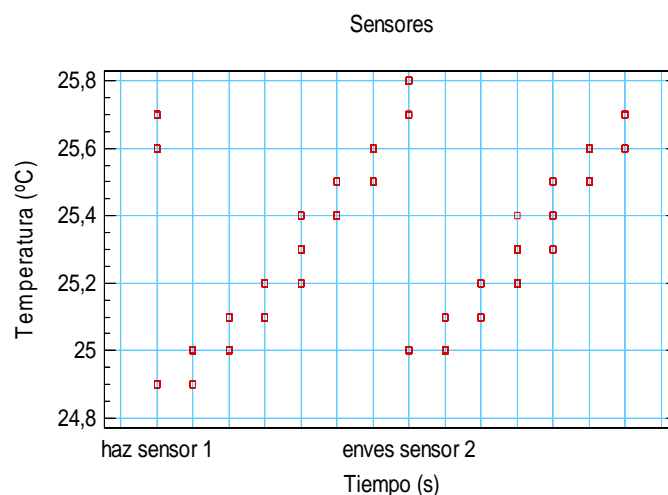


Gráfica 33. Temperatura ambiente de la maceta nº1.

Los incrementos térmicos medidos con la cámara termográfica tienen mayor selectividad que los medidos con los registradores autónomos. Podemos confirmar que los datos obtenidos son correctos ya que existe una leve variación.

### – Sensores:

Para corroborar que la temperatura que alcanzan los hobos en sus registros son ciertas analizaremos los sensores en las hojas a lo largo de todo el ensayo.



Gráfica 34. Sensores planta nº1, ensayo panel de abajo.

Estimamos que la temperatura registrada por los hobos y sensores es similar, por lo que deducimos que son reales.

### 5.2.2. DOS PANELES.

En este ensayo, comprobaremos las diferencias existentes entre la zona de sombreado y la de máxima radiación. Los datos analizados a continuación corresponden al ensayo con dos paneles en funcionamiento, puesto que en esta posición el umbral calorífico que se emite a las plantas es mayor.

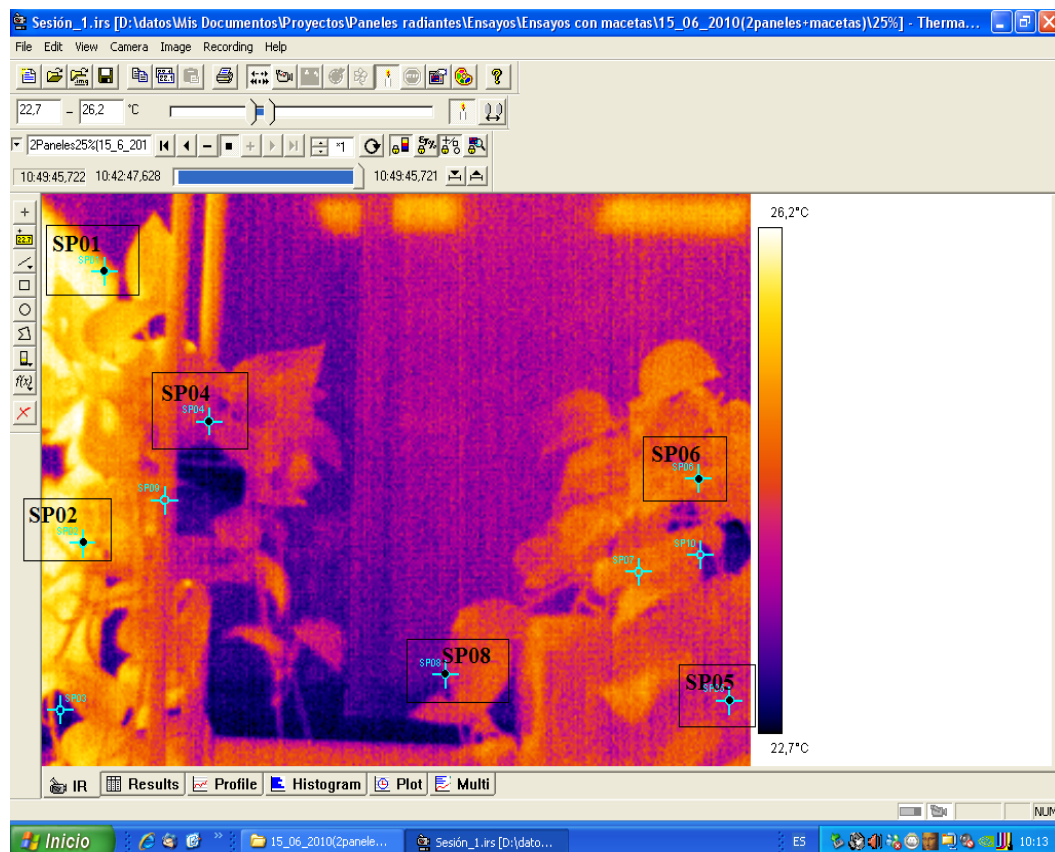


Figura 26. Imagen termográfica, ensayo n°2 dos paneles conectados.

### 5.2.2.1. INCREMENTOS DE TEMPERATURA.

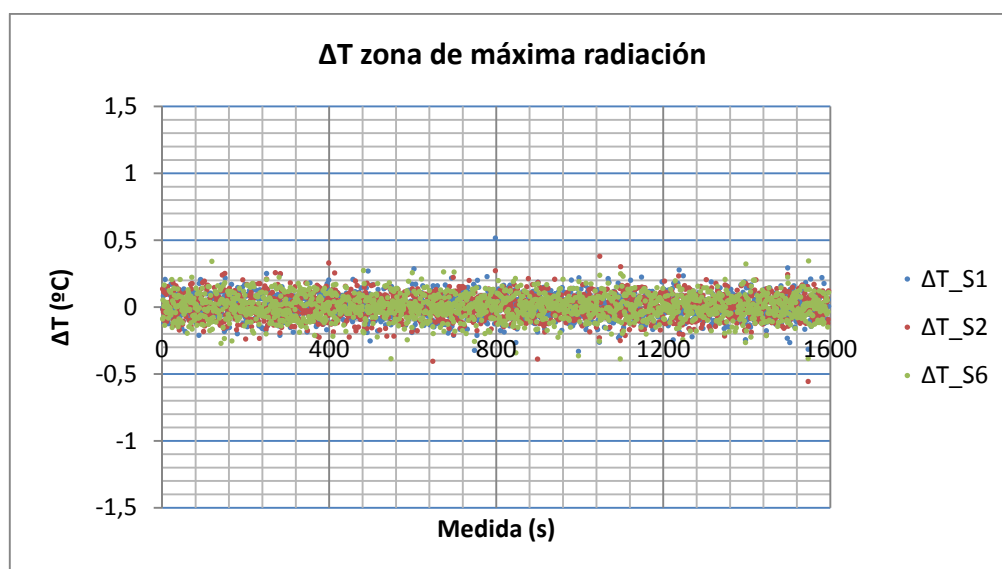
Estudiamos los incrementos de temperatura en ambas zonas. Para ello se tomaron 3 puntos característicos de cada una de ellas.

Puntos de la zona de máxima irradiación: SP01, SP02, SP06.

Puntos de la zona de sombreado: SP04, SP05, SP08.

#### Ensayo completo:

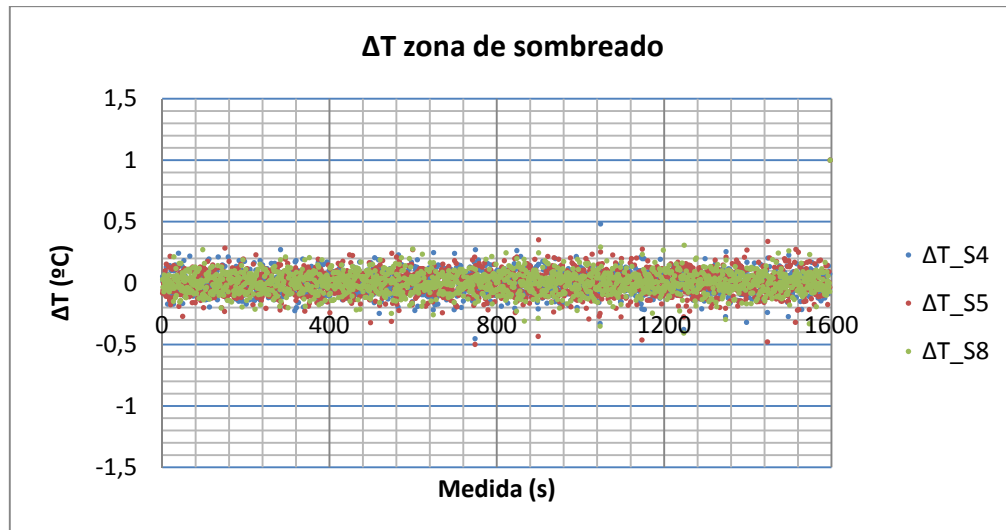
##### ▪ Zona de máxima radiación:



Gráfica 35. Zona de máxima radiación, dos paneles, plantas delante y detrás.



### ▪ Zona de sombreado:

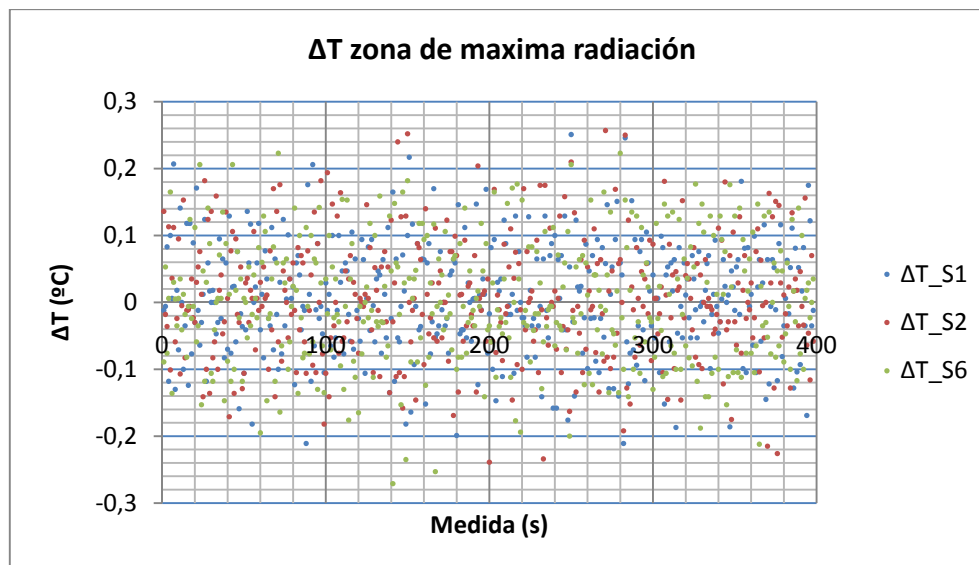


Gráfica 36. Zona de sombreado, dos paneles, plantas delante y detrás.

### Ensayo con la potencia al 25%:

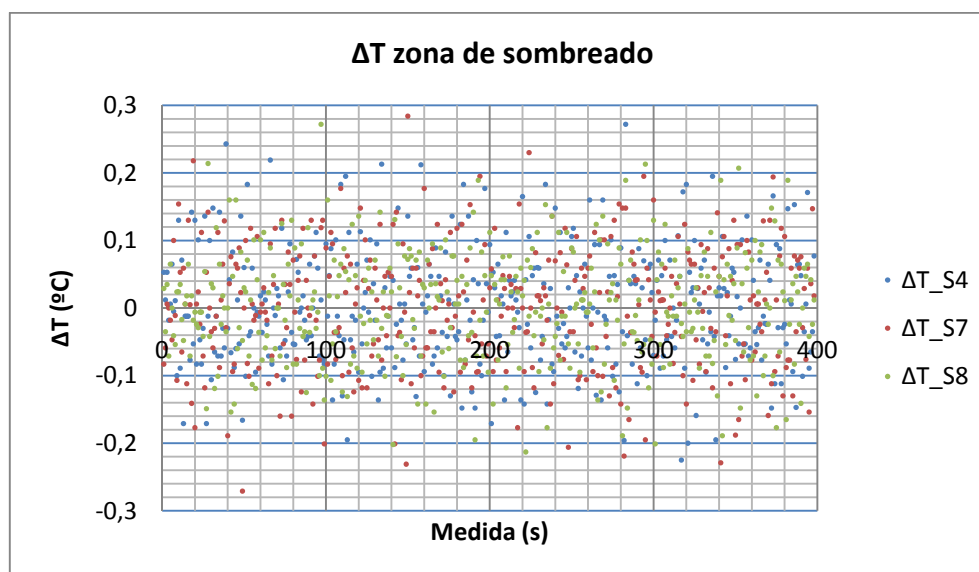
Para una mejor visualización de los incrementos de temperatura, nos centraremos en las primeras 400 medidas que se tomaron con la potencia al 25% (565W), que es en el instante inicial que se conecta el panel a la fuente de alimentación.

### ▪ Zona de máxima radiación:



Gráfica 37. Zona de máxima radiación, dos paneles al 25%, plantas delante y detrás.

### ▪ Zona de sombreado:



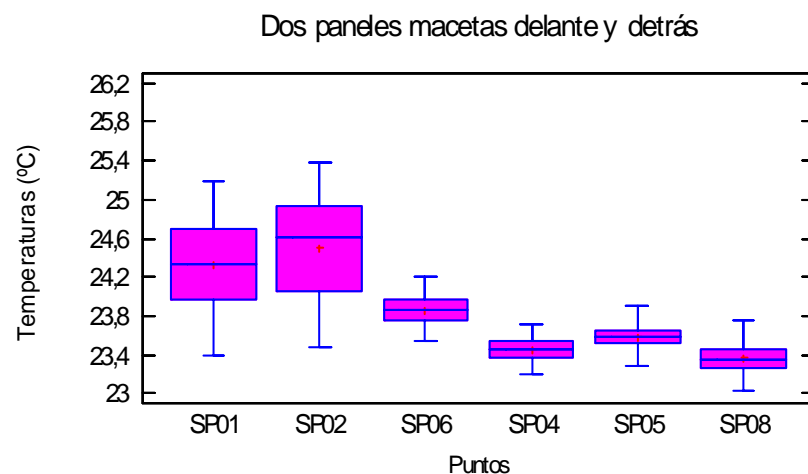
Gráfica 38. Zona de sombreado, dos paneles al 25%, plantas delante y detrás.

En las dos gráficas podemos considerar que los puntos situados en la zona de sombreado y los localizados en la zona de máxima radiación están en el mismo intervalo. Aunque estén dentro del mismo intervalo, en la zona de máxima radiación los incrementos térmicos están menos concentrados en torno a cero, por lo que van a alcanzar mayores temperaturas.

### 5.2.2.2. DIFERENCIAS TÉRMICAS ENTRE LA ZONA DE MÁXIMA RADIACIÓN Y SOMBREADO.

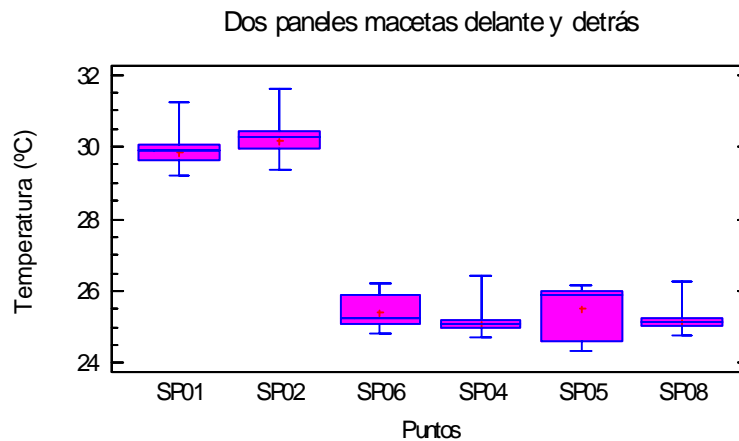
A continuación, analizaremos las temperaturas que se alcanzan en cada punto, para determinar las diferencias que se producen en ambas zonas. Por ello tendremos en cuenta los ensayos realizados con un consumo del 25% y 100%.

**Con una potencia de 565W, potenciómetro al 25%:**



Gráfica 39. Plantas delante y detrás con ambos paneles, potenciómetro al 25%.

**Con una potencia de 1732W, potenciómetro al 100%:**



Gráfica 40. Plantas delante y detrás con ambos paneles, potenciómetro al 100%.

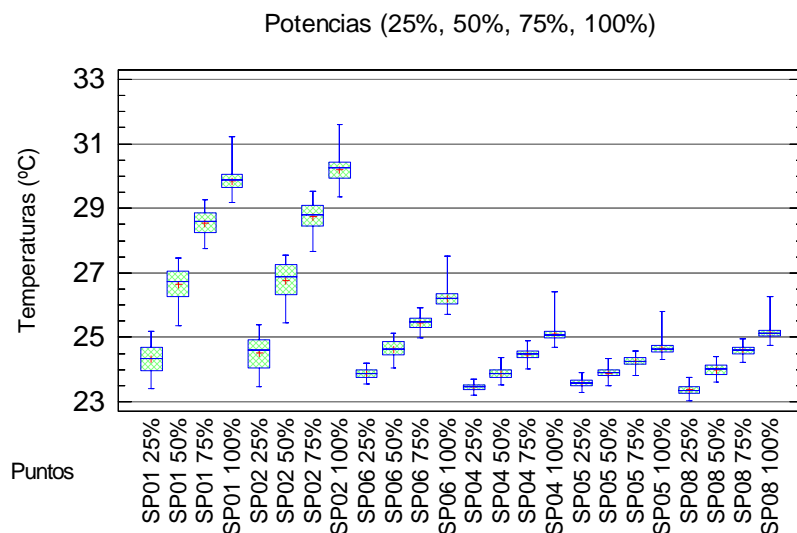
En la primera gráfica (gráfica 39) podemos considerar que los puntos correspondientes a la zona de máxima radiación tiene unos valores térmicos más altos respecto a los de la zona de sombreado. La diferencia térmica entre ellos con una potencia al 25%(565W) es de aproximadamente un 1°C.

Cuando el potenciómetro está al 100% (gráfica 40), se origina un salto térmico en los puntos situados en la zona de máxima radiación, sobre todo en los puntos SP01 y SP02. Son los que se sitúan más cercanos a los paneles. El punto SP06 no sufre ese incremento térmico tan acusado, aunque su transferencia térmica no esté obstaculizada, percibe menos radiación calorífica debido a que se sitúa más alejado a los paneles. Puntualizamos que los puntos situados en la zona de sombreado y el SP06 (zona de máxima radiación, pero más alejado que los punto SP02 Y SP01) tienen una diferencia térmica aproximada de 4°C respecto a SP01 Y SP02.

Por lo que podemos confirmar que las zonas de baja inercia térmica de la planta son las situadas más alejadas a los paneles y por supuesto la zona de sombreado.

Seguidamente representaremos los comportamientos de los distintos puntos tomados de la imagen térmica conforme se modificó la potencia en orden ascendente:

- 565W (25%).
- 1160 W (50%).
- 1533 W (75%).
- 1732 W (100%).

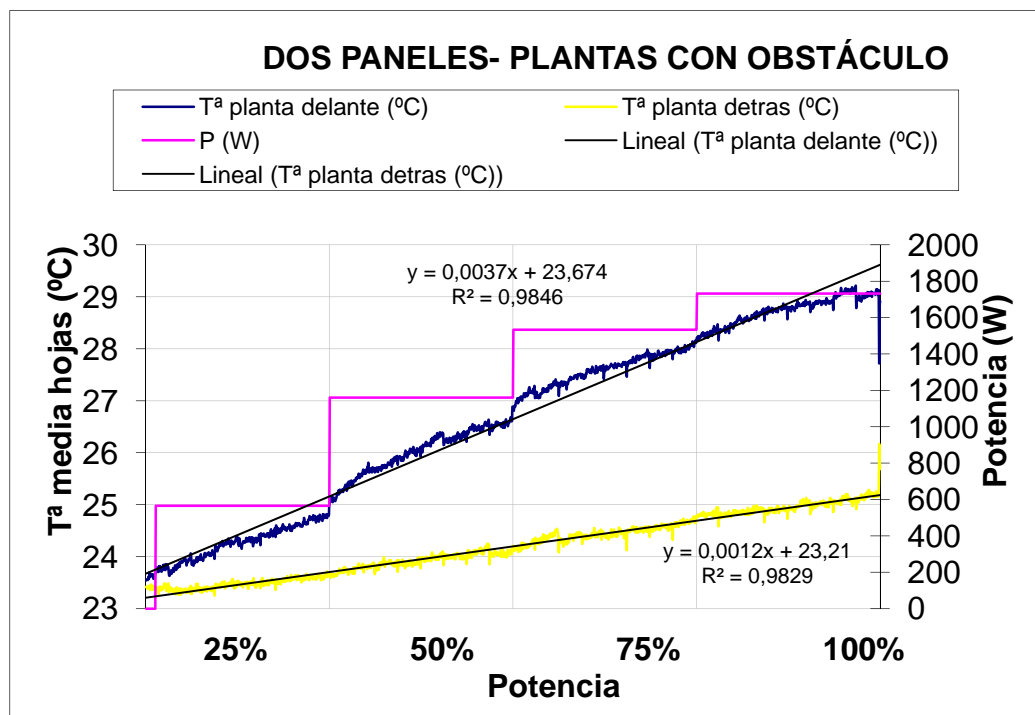


Gráfica 41. Puntos a distintas potencias con ambos paneles, plantas delante y detrás.

En dicha gráfica (gráfica 41) observamos el comportamiento térmico a lo largo del tiempo que tienen los puntos, seleccionados de las plantas, conforme se incrementa la potencia. Los puntos que se encuentran situados más cercanos al panel, o sea en la zona de máxima radiación, las temperaturas que alcanzan son bastante mayores en relación a los demás puntos. Por ello tenemos en cuenta que la inercia térmica del panel va descendiendo en relación a la distancia y obstáculos presentes en su camino.

No obstante para poder alcanzar una temperatura óptima se necesitaría incrementar la potencia para que los puntos situados en la zona de sombreado y los más alejados alcancen la temperatura que requeriríamos, por lo que el aumento de dicha temperatura provocaría daños fisiológicos (algunos pudiendo llegar a ser irreversibles) en la planta debido a la gran diferencia térmica que podría existir entre ambas zonas.

5.2.2.3. DIFERENCIAS TÉRMICAS ENTRE LA ZONA DE MÁXIMA RADIACIÓN Y SOMBREADO A DISTINTAS POTENCIAS.



Gráfica 42. Diferencias térmicas entre ambas zonas, dos paneles, plantas delante y detrás.

### 5.3. COMPARACIÓN TÉRMICA DE LAS DISTINTAS DISTANCIAS CON RESPECTO A LOS PANELES.

El último punto a desarrollar, son los ensayos realizados a distintas distancias con respecto a los paneles, 95 cm, 158 cm, 220 cm. Se han ensayado con el panel inferior, el superior y ambos conectados a la vez. Las plantas se colocaron enfrente de cada panel MN, para ello se construyó un soporte adecuado a las necesidades a cumplir. Cada planta estaba separada 60 cm con respecto a la base de cada una.

#### 5.3.1. DOS PANELES.

Los datos que seguidamente vamos a tratar corresponden a los ensayos realizados con ambos paneles conectados a la fuente de alimentación. En dichos ensayos las plantas se situán cada una frente a un panel, ya que al estar las plantas a distintas alturas comprobaremos si se necesita mayor área de transmisión de energía calorífica.

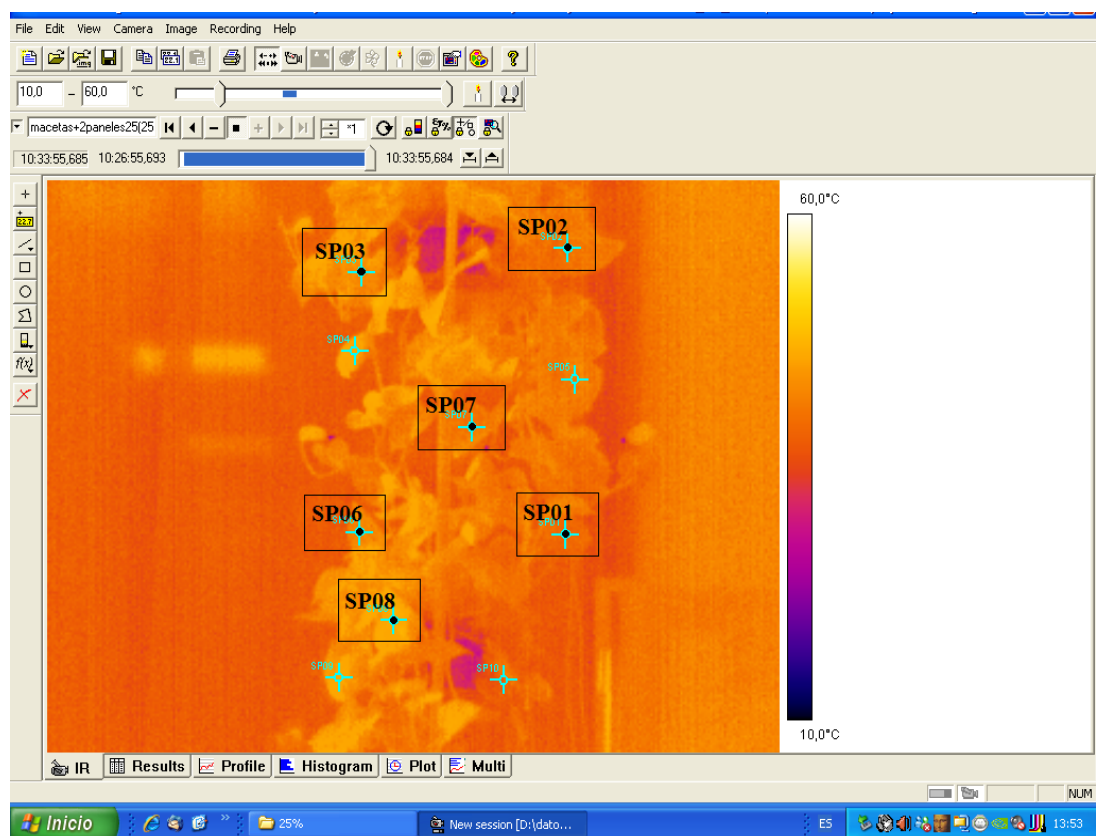


Figura 27. Imagen termográfica, ensayo nº4.

### 5.3.1.1. INCREMENTOS DE TEMPERATURA.

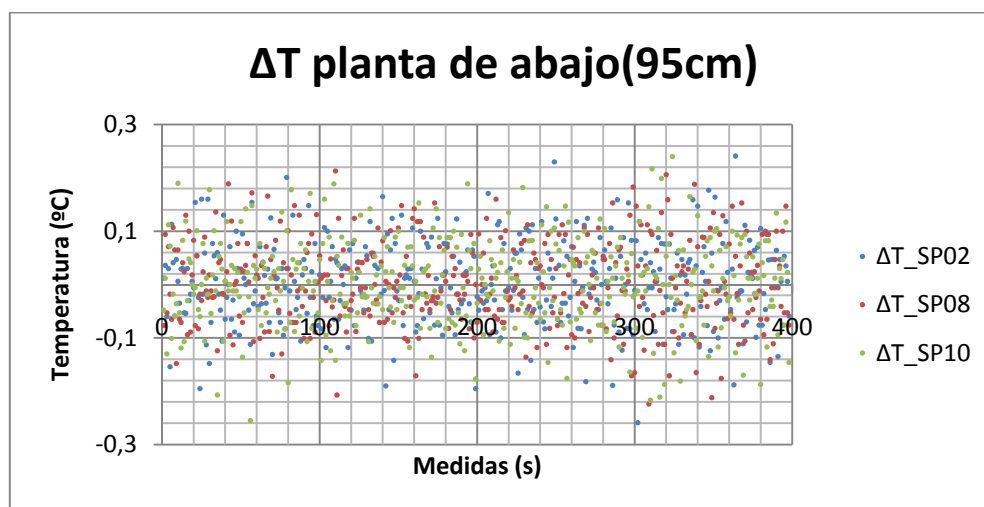
Estudiamos los incrementos de temperatura a las distintas distancias con una potencia aproximada de 600W, el potenciómetro está al 25%.

Para el análisis tomamos 6 puntos representativos, en todos los ensayos tomamos aproximadamente los mismos puntos. De los cuales tres pertenecen a la planta de arriba y tres a la de abajo.

#### Las plantas separadas 95 cm de los paneles.

- Puntos de la planta de abajo: SP02, SP08, SP10.
- Puntos de la planta de arriba: SP03, SP04, SP09.

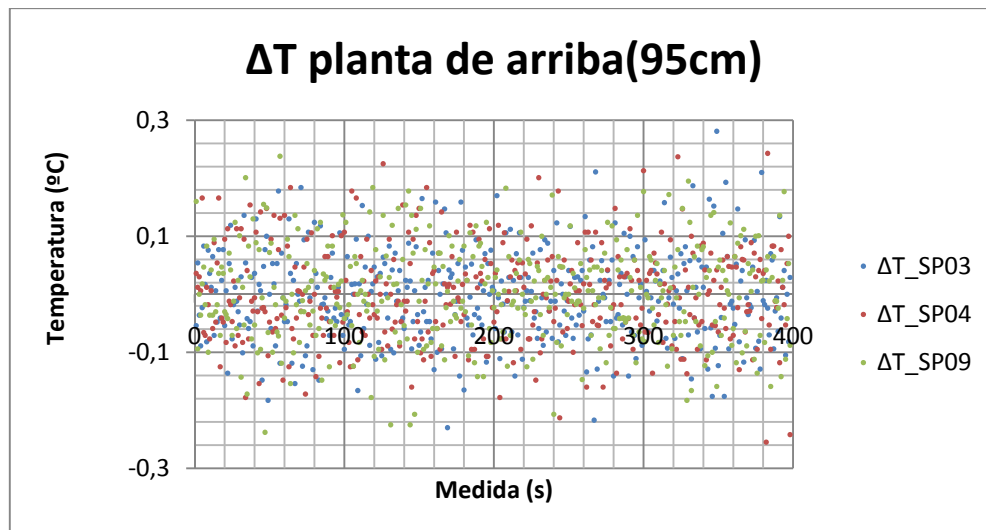
#### ▪ Planta de abajo:



Gráfica 43. Incremento de temperatura a 95cm, ambos paneles.



### ▪ Planta de arriba:

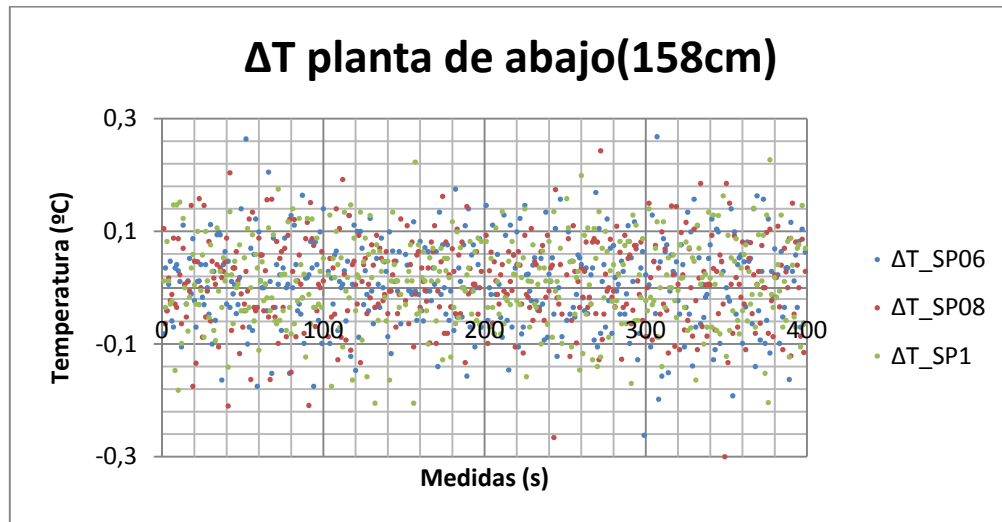


Gráfica 44. Incremento de temperatura a 95cm, ambos paneles.

### Las plantas separadas 158 cm de los paneles.

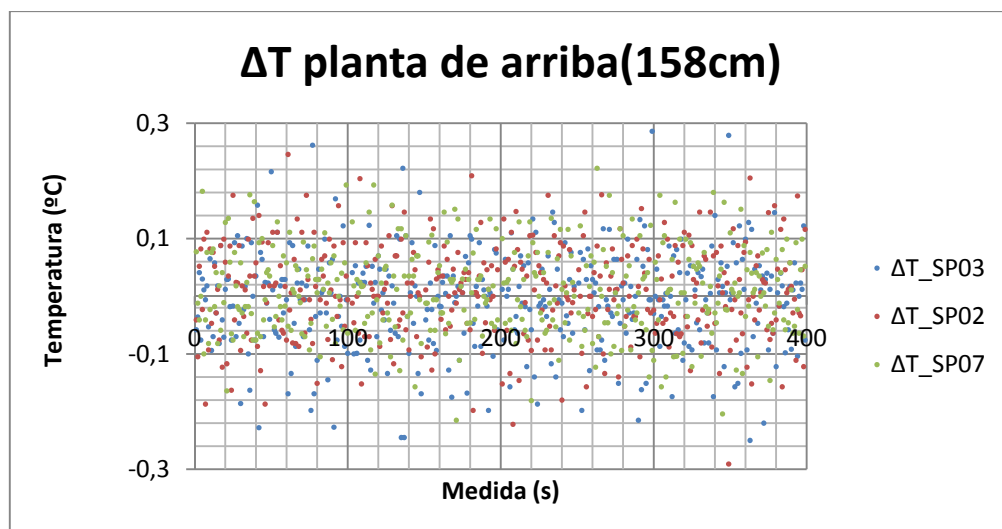
- Puntos de la planta de abajo: SP06, SP08, SP1.
- Puntos de la planta de arriba: SP03, SP02, SP07.

### ■ Planta de abajo.



Gráfica 45. Incremento de temperatura a 158cm, ambos paneles.

### ■ Planta de arriba.

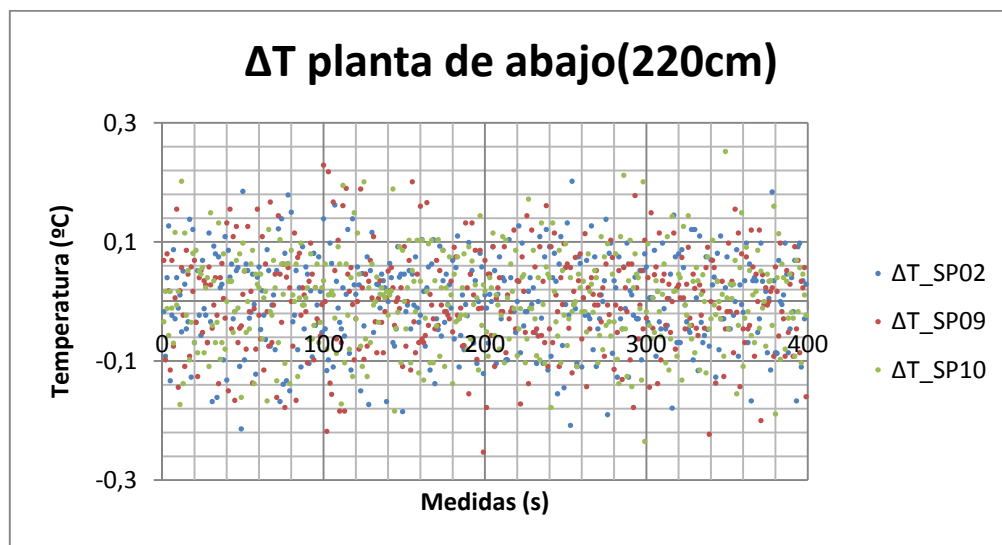


Gráfica 46. Incremento de temperatura a 158cm, ambos paneles.

### Las planta separadas 220 cm de los paneles.

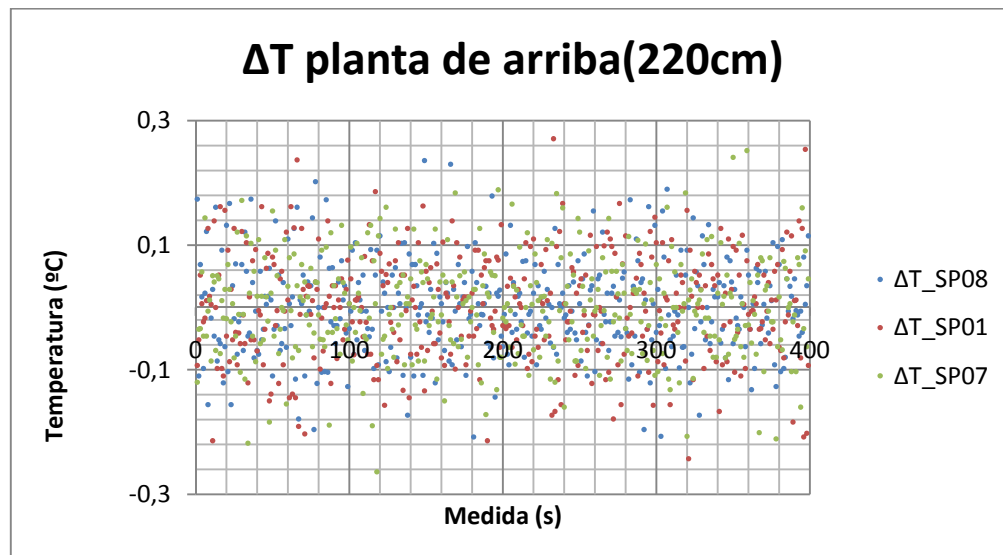
- Puntos de la planta de abajo: SP02, SP09, SP10.
- Puntos de la planta de arriba: SP08, SP01, SP07.

#### ■ Planta de abajo.



Gráfica 47. Incremento de temperatura a 220cm, ambos paneles.

### ■ Planta de arriba.



Gráfica 48. Incremento de temperatura a 220cm, ambos paneles.

Podemos deducir de todas estas gráficas (gráficas 43, 44, 45, 46, 47, 48), que los incrementos térmicos son análogos a las distintas distancias y en ambas plantas. Puesto que la gran mayoría de los puntos oscilan en un intervalo de amplitud 0,2. Nos van a indicar que las plantas están recibiendo la misma proporción de energía calorífica en cualquier punto, independientemente de las temperaturas que se alcancen. Hemos tomado los datos del instante inicial de la conexión, primeros 400s, ya que es el punto más crítico. Por último, destacamos que los puntos situados frente a los paneles, sus temperaturas alcanzadas son mayores, debido a que los incrementos térmicos están más alejados del cero. Además, en la zona más alejada a los paneles los incrementos térmicos oscilan en torno a cero, que se van dispersando conforme se van reduciendo la distancia entre los paneles y las plantas.

#### 5.3.1.2. DIFERENCIAS TÉRMICAS.

Para una mayor comprensión de las temperaturas que se alcanzaron en cada ensayo tomaremos 4 puntos, correspondientes en todos los casos aproximadamente a los mismos, dos delanteros y dos traseros, de las macetas situadas a 95cm y 220cm. Discutiremos la diferencia térmica existente entre las dos posiciones a distintas potencias. También, el contraste térmico entre la parte delantera y trasera,

superior e inferior de las plantas con respecto a los paneles de un mismo ensayo. Es decir, un estudio de la posición y de la distancia.

### 5.3.1.2.1. A 95cm CONTRASTE TÉRMICO ENTRE LA ZONA DELANTERA Y TRASERA, SUPERIOR E INFERIOR DE LAS PLANTAS.

A 95cm seleccionaremos los siguientes puntos: SP03, SP08, SP04, SP02. Donde corresponden:

	Punto delantero	Punto trasero
Planta de arriba	SP03	SP04
Planta de abajo	SP08	SP02

Tabla 16. Clasificación de los puntos a 95cm con ambos paneles conectados, ensayo n°3.

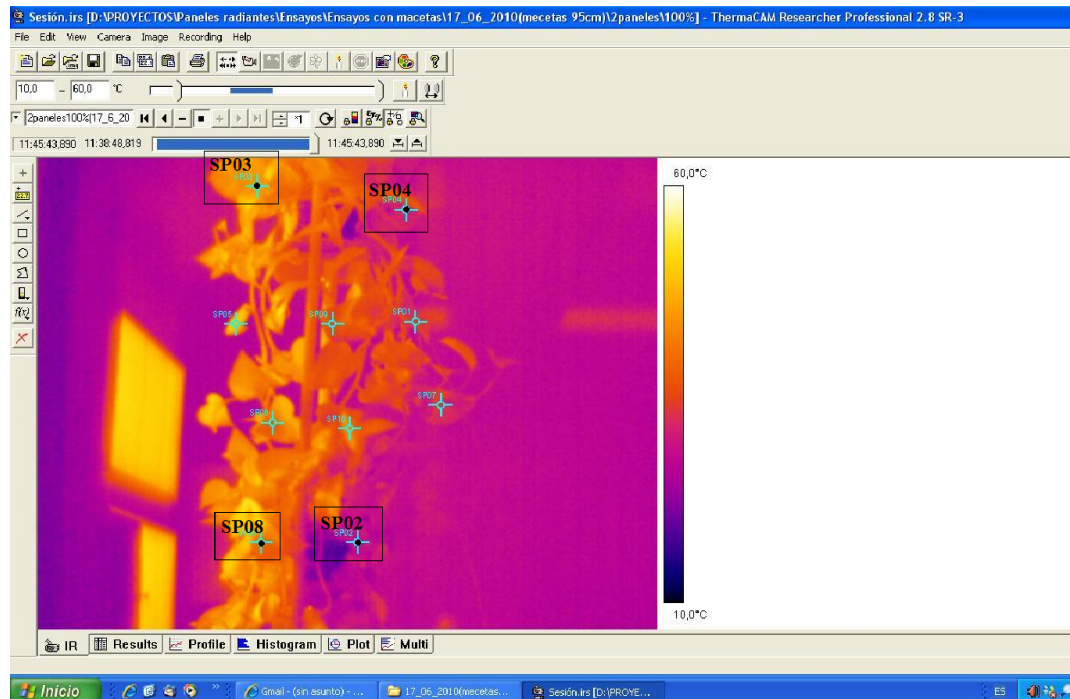
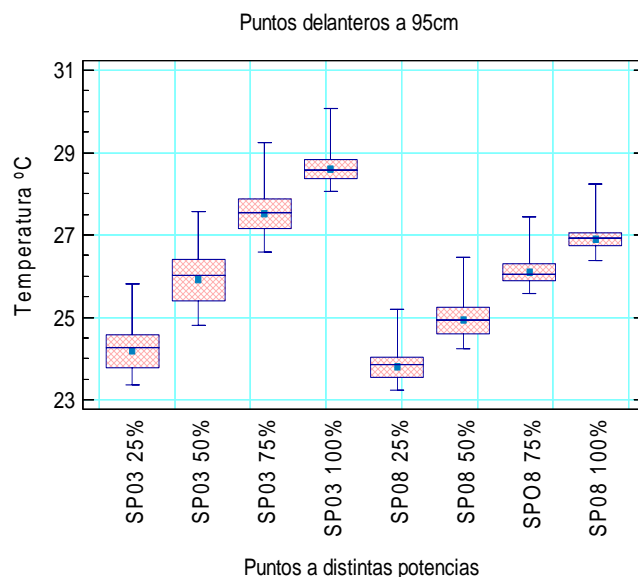


Figura 28. Imagen termográfica ensayo n°3, dos paneles con regulación.

### 5.3.1.2.1.1. PARTE DELANTERA, DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL PUNTO SUPERIOR E INFERIOR.

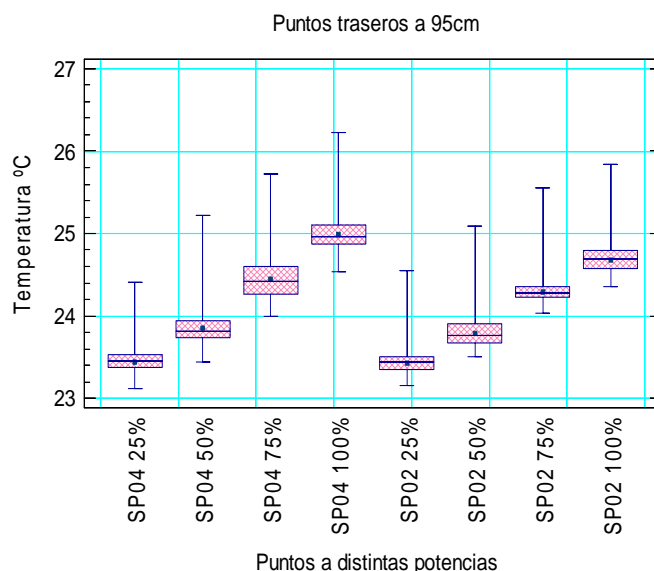


Gráfica 49. Diferencia térmica zona delantera 95cm, ambos paneles conectados.

En la presente gráfica (gráfica 49) podemos apreciar que el punto SP03 adquiere mayor temperatura que el SP08, aunque los dos estén situados en la parte delantera, frente al panel y sin ningún tipo de obstáculos. Desarrollándose el principio físico de la transmisión de energía por convección, es decir, las hojas de la planta de abajo al calentarse modifican la temperatura del aire, calentándose por convección al contacto con las hojas calientes que se encuentran a su alrededor por intercambio radiactivo. El aire caliente al pesar menos sube hacia arriba transmitiendo esa energía calorífica a las hojas de la planta superior. La evolución del contraste térmico se va intensificando a lo largo del ensayo, siendo de más de un 1°C al final de él.

También señalamos que la temperatura de las hojas va aumentando conforme se va incrementando la potencia. Por ejemplo, el punto SP03 partía, en el instante inicial de la conexión, de una temperatura de 23,8°C (al 25%), pero esta fue modificándose en el tiempo igual que el consumo en orden ascendente, terminado con una temperatura de 28,9°C. La diferencia de temperatura entre los dos consumos, máximo y mínimo, es de 4,9 °C (SP03). En el punto SP08 la diferencia de temperatura es algo menor, es de 3,2°C, debido al principio físico citado.

### 5.3.1.2.1.2. PARTE TRASERA, DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL PUNTO SUPERIOR E INFERIOR.



Gráfica 50. Diferencia térmica zona trasera 95cm, ambos paneles conectados.

En la siguiente gráfica (gráfica 50) ocurre lo mismo que en la anterior (gráfica 49).

Las temperaturas alcanzadas en la parte trasera de las plantas son ligeramente menores respecto a la delantera. Es debido, a que en las hojas de la parte trasera, la radiación infrarroja transmitida por el panel tiene que pasar una serie de obstáculos para calentarlas, dando lugar a una baja inercia térmica. La diferencia térmica en el punto SP04 es de 1,7°C y en el SP02 de 1,4 °C.



	$\Delta T = (T_{pot\_max}^a - T_{pot\_min}^a)$	
	Puntos delanteros	Puntos traseros
Planta de arriba	SP03 $\Delta T = 4,9^{\circ}C$	SP04 $\Delta T = 1,7^{\circ}C$
Planta de abajo	SP08 $\Delta T = 3,2^{\circ}C$	SP02 $\Delta T = 1,4^{\circ}C$

Tabla 17. Clasificación de los incrementos térmicos a 95cm, con ambos paneles conectados, ensayo nº3.

Terminamos señalando, que a lo largo del ensayo se incrementa la variación térmica entre la parte delantera y trasera, por lo que el calor no se distribuye de manera uniforme.

### 5.3.1.2.2. A 220cm CONTRASTE TÉRMICO ENTRE LA ZONA DELANTERA Y TRASERA, SUPERIOR E INFERIOR DE LAS PLANTAS.

A 220cm seleccionaremos los siguientes puntos: SP04, SP09, SP01, SP02. Donde corresponden:

	Punto delantero	Punto trasero
Planta de arriba	SP04	SP01
Planta de abajo	SP09	SP02

Tabla 18. Clasificación de los puntos a 220cm con ambos paneles conectados, ensayo nº5.



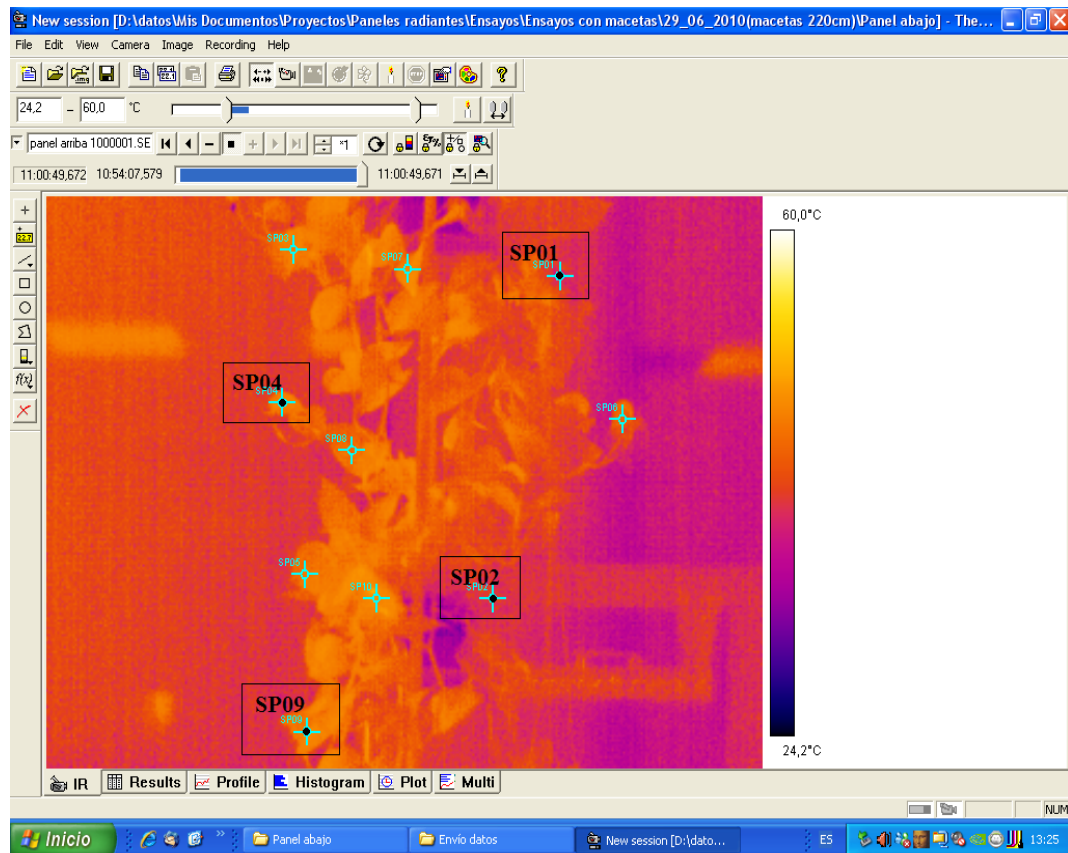
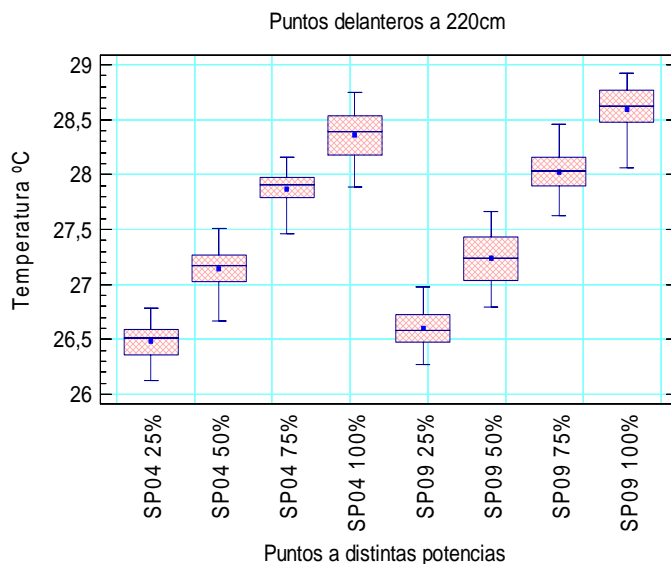


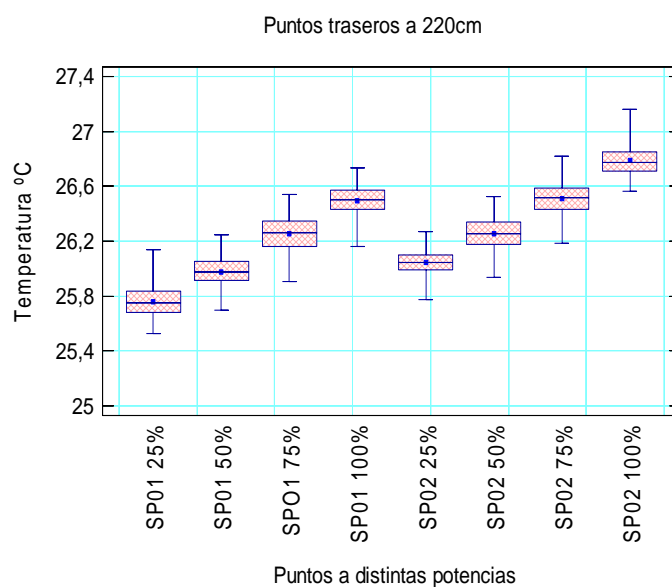
Figura 29. Imagen termográfica ensayo nº5, dos paneles con regulación.

### 5.3.1.2.2.1. PARTE DELANTERA, DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL PUNTO SUPERIOR E INFERIOR.



Gráfica 51. Diferencia térmica zona delantera 220cm, ambos paneles conectados.

### 5.3.1.2.2.2. PARTE DE DETRÁS, DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL PUNTO SUPERIOR E INFERIOR.



Gráfica 52. Diferencia térmica zona trasera 220cm, ambos paneles conectados.



Debemos de tener en cuenta que en este ensayo las plantas no parten de la misma temperatura que en el ensayo anterior, a 95cm, lo podemos observar con claridad en las gráficas 49, 50, 51 y 52. Corresponde que la temperatura de partida con una potencia del 25% (560 W) era unos grados centígrados más alta a la hora de comenzar en ensayo.

	$\Delta T = (T_{pot\_max}^a - T_{pot\_min}^a)$	
	Puntos delanteros	Puntos traseros
Planta de arriba	SP04 $\Delta T = 2,1^{\circ}C$	SP01 $\Delta T = 0,9^{\circ}C$
Planta de abajo	SP09 $\Delta T = 2,3^{\circ}C$	SP02 $\Delta T = 0,4^{\circ}C$

Tabla 19. Clasificación de los incrementos térmicos a 220cm, con ambos paneles conectados, ensayo n°5.

Comparando ambas zonas, delantera y trasera (gráficas 50,52), identificamos que en la zona delantera se produce un incremento de  $2,1^{\circ}C$ , desde que conectamos inicialmente los paneles con una potencia del 25% (560 W), hasta que los detenemos con un consumo del 100%, correspondiendo al punto SP04. En la parte trasera los incrementos de temperatura son de  $0,9^{\circ}C$  en el punto SP01. El contraste existente entre ambas zonas es de unos  $1,2^{\circ}C$  aproximadamente. Sucede lo mismo que en el caso anterior, debido a los obstáculos, que actúan de interferencia para el paso de la radiación y con ello la transmisión de calor.

#### 5.3.1.2.3. DIFERENCIA TÉRMICA DE LAS DOS POSICIONES A DISTINTAS POTENCIAS.

En cuanto, a la diferencia entre las distintas distancia es a 95cm y 220cm, caben destacar los siguientes resultados:



	$\Delta T = (T_{pot\_max}^a - T_{pot\_min}^a)$	
	Puntos delanteros	Puntos traseros
Planta a 95cm	SP03 $\Delta T = 4,9^{\circ}C$	SP04 $\Delta T = 1,7^{\circ}C$
Planta a 220cm	SP04 $\Delta T = 2,1^{\circ}C$	SP01 $\Delta T = 0,9^{\circ}C$

Tabla 20. Clasificación de los incrementos térmicos a 95cm y 220cm, con ambos paneles conectados.

El incremento térmico de un punto situado en los dos ensayos en el mismo sitio tiene diferentes valores. Por ejemplo, observaremos un punto delantero y otro trasero. Delantero; el punto SP03 a 95cm sufre una diferencia de 4,9 °C, desde la potencia mínima hasta la máxima, en cambio a 220cm es de 2,1°C y el punto que le correspondería sería SP04. Traseros; el punto SP04 a 95cm sufre un incremento de 1,7°C, desde la potencia mínima hasta la máxima, a 220cm es de 1°C correspondiente a SP01.

Podemos concluir que a 95cm la planta tiene unos incrementos térmicos bastantes más acusados entre la parte delantera y trasera respecto a 220cm. Ya que la inercia térmica va disminuyendo conforme se van distanciando las plantas de los paneles.

La evolución de las temperaturas medias de las zonas de sombreado y máxima radiación se muestra en las siguientes gráficas:

### Plantas a 95cm:

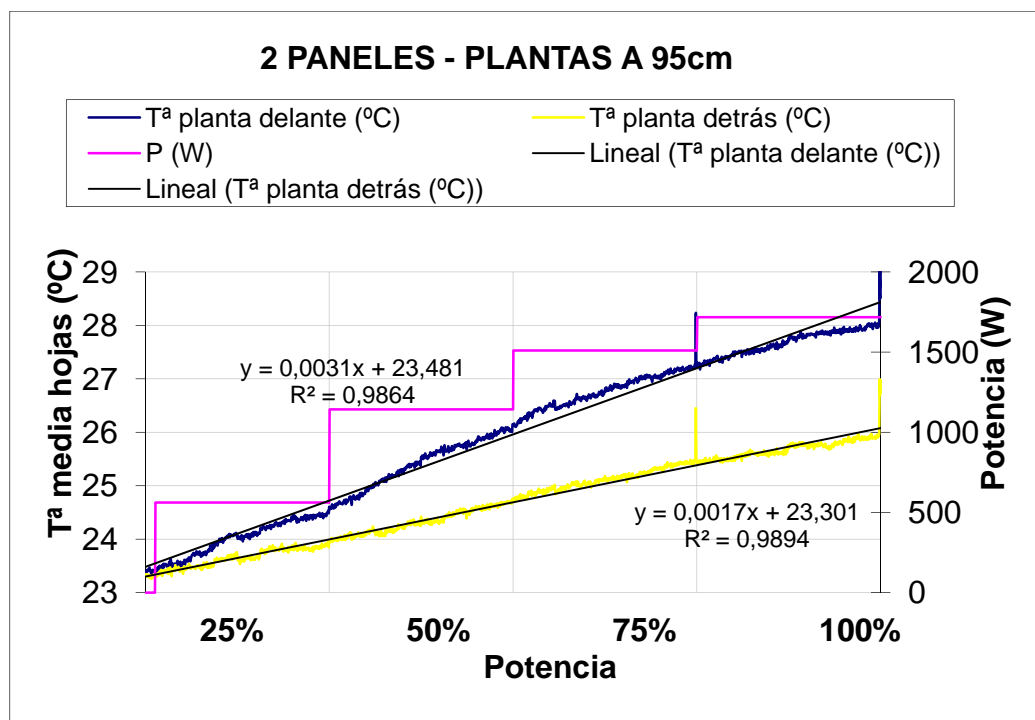


Gráfico 53. Diferencias térmicas entre ambas zonas, plantas a 95cm ambos paneles conectados.

### Plantas a 220cm:

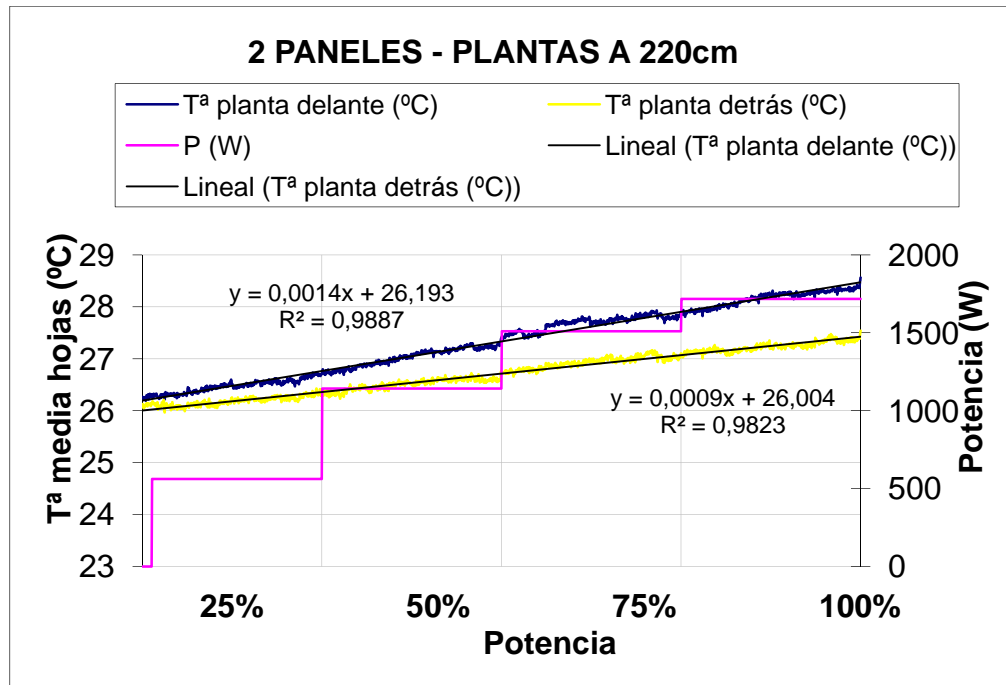


Gráfico 54. Diferencias térmicas entre ambas zonas, plantas a 220cm ambos paneles conectados.

Apreciamos gráficamente que a una distancia de 95cm (gráfica 53), hay una diferencia de temperatura evidente entre ambas zonas. Además por cada vez que aumenta la parte trasera  $1^{\circ}\text{C}$  la parte delantera incrementa  $2^{\circ}\text{C}$ . El calor se distribuye de forma heterogénea aumentando los gradientes térmicos en orden ascendente a la potencia.

En cambio, a una distancia de 220cm la diferencia térmica entre ambas zonas no es tan desigual (gráfica54). Por lo demás, la temperatura que medimos cada 400 segundos con cada potencia llega a estabilizarse, lo que no ocurre a 95cm.

En general, la distribución del calor debe conseguir una homogeneidad térmica, minimizando los gradientes térmicos, tanto horizontales como verticales, para que se desarrollen las plantas de forma óptima, con el objetivo de evitar el consumo innecesario de energía, por lo que a una posición de 220cm sería más ideal que a 95cm.



### 5.3.2. PANEL DE ABAJO.

A continuación examinaremos los datos obtenidos del ensayo efectuado a un sólo panel conectado a la fuente de alimentación. En dicho ensayo las plantas se sitúan cada una frente a un panel, pero sólo funcionando el de abajo.

#### 5.3.2.1. DIFERENCIAS TÉRMICAS.

A continuación mostraremos las temperaturas que se obtuvieron en cada ensayo, para ello se seleccionaron los cuatro puntos más significativos de la imagen. Éstos están ubicados en el mismo lugar en todos los ensayos, dos delanteros y dos traseros, de las plantas situadas a 95cm y 220cm. Conjuntamente argumentaremos la diferencia térmica existente entre las dos posiciones a distintas potencias. También, el contraste térmico entre la zona delantera y trasera, superior e inferior de las plantas en relación al panel.

##### 5.3.2.1.1. A 95cm CONTRASTE TÉRMICO ENTRE LA ZONA DELANTERA Y TRASERA, SUPERIOR E INFERIOR DE LAS PLANTAS.

A 95cm seleccionaremos los siguientes puntos: SP03, SP08, SP04, SP02. Donde corresponden:

	Punto delantero	Punto trasero
Planta de arriba	SP03	SP04
Planta de abajo	SP08	SP02

Tabla 21. Clasificación de los puntos a 95cm con un panel conectado, ensayo nº3.

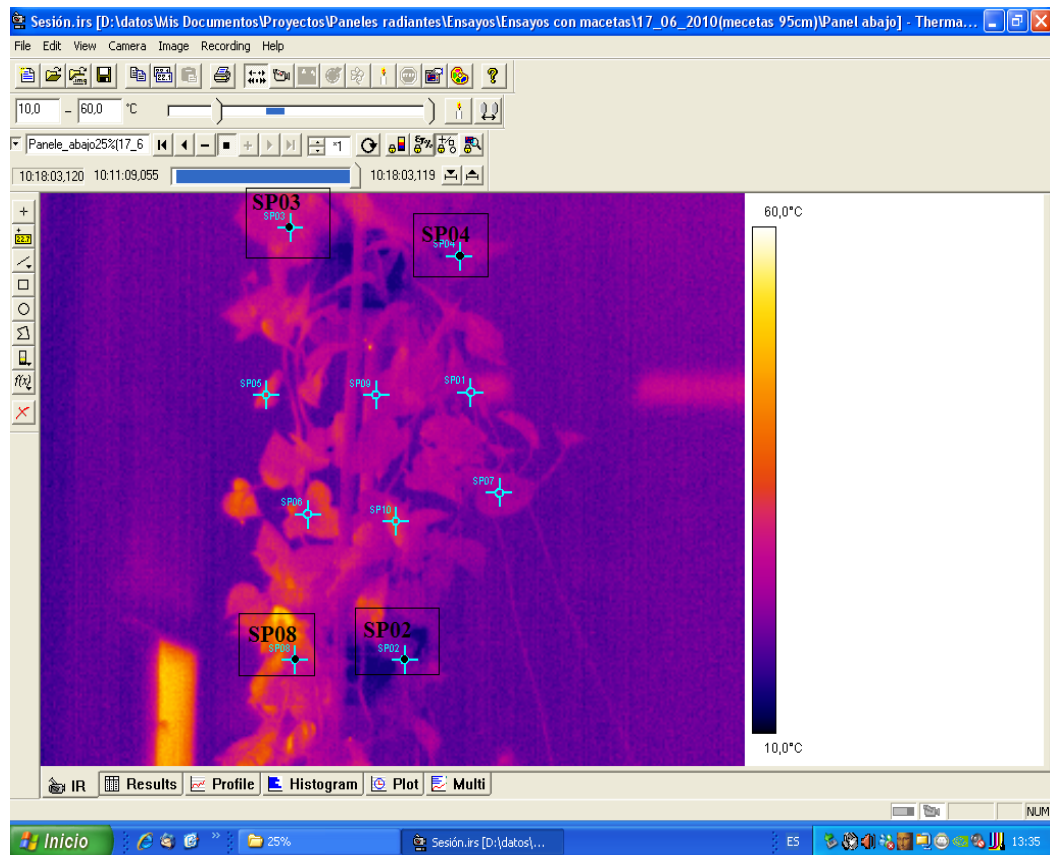
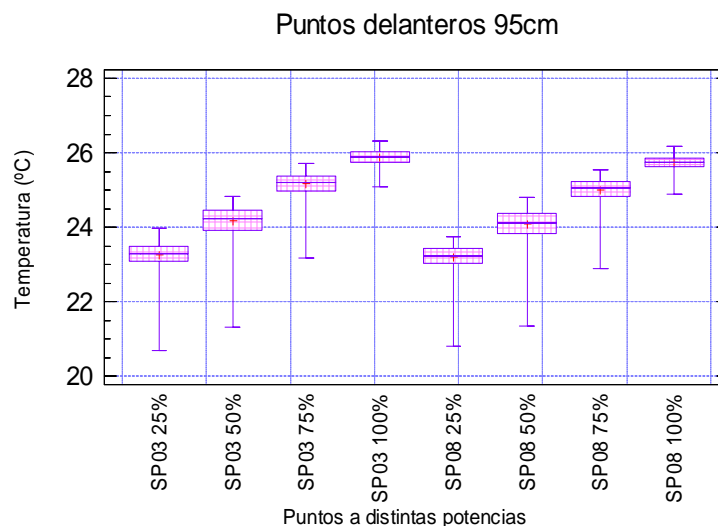


Figura 30. Imagen termográfica ensayo nº3, un panel con regulación.



### 5.3.2.1.1.1. PARTE DELANTERA, DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL PUNTO INFERIOR Y SUPERIOR.



Gráfica 55. Diferencia térmica zona delantera 95cm con un panel conectado.

En esta gráfica (gráfica 55), contemplamos que no existe una diferencia térmica significativa entre el punto situado en la parte superior e inferior. En cambio, en el mismo apartado cuando están conectados ambos paneles sí que se origina, en el punto SP03 los valores térmicos alcanzados son superiores a 95cm que a 220cm.

En el actual ensayo, también se da el mismo principio físico antes señalado, se modifica la temperatura del aire al calentarse por convección al contacto con las hojas calientes de la planta de abajo, este aire caliente al pesar menos sube hacia arriba transmitiendo esa energía calorífica a las hojas de la planta de arriba. En este caso el panel incide directamente sobre la planta inferior, llegando a la de arriba menor energía calorífica, además la planta de arriba también se halla más alejada de panel, que es otro de los factores a tener en cuenta. Por lo que la planta inferior recibe la mayor parte de la energía calorífica calentando sus hojas, pero al mismo tiempo que las hojas reciben esa inercia térmica la transmiten por convección a la planta de arriba.



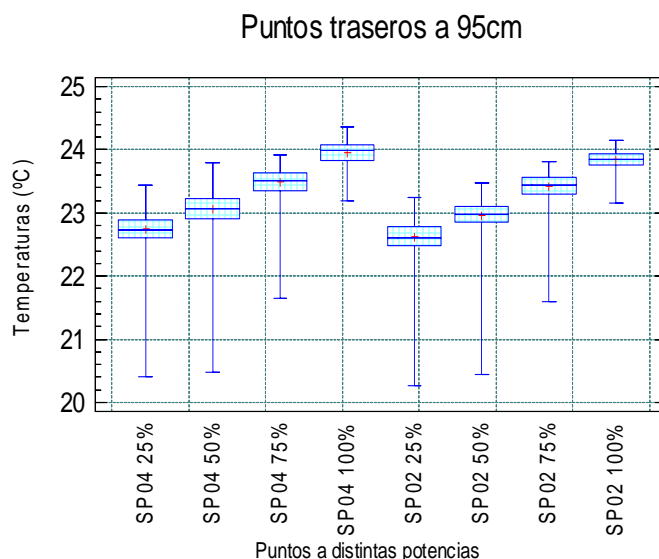
	$\Delta T = (T_{pot\_max}^a - T_{pot\_min}^a)$	
	Planta de arriba	Planta de abajo
2 Paneles	SP03 $\Delta T = 4,9^{\circ}C$	SP08 $\Delta T = 3,2^{\circ}C$
1 Panel	SP03 $\Delta T = 2,9^{\circ}C$	SP08 $\Delta T = 2,7^{\circ}C$

Tabla 22. Clasificación de las diferencias térmicas de la planta a 95cm de la parte delantera con un panel y ambos paneles, ensayo n°3.

Matizamos que la temperatura alcanzada en las plantas con un solo panel en relación a la potencia no aumenta tan drásticamente como con los paneles conectados conjuntamente. Por ejemplo, el punto SP03, cuando están ambos paneles conectados partía de  $23,8^{\circ}C$ , al 25%, en el instante inicial de la conexión, pero esta temperatura fue incrementándose en el tiempo conforme se aumentaba la potencia, terminado con una temperatura de  $28,9^{\circ}C$ . La diferencia de temperatura entre los consumos, máximo y mínimo, es de  $4,9^{\circ}C$ . En cambio, el mismo punto con un único panel conectado, comienza con una temperatura de  $23,1^{\circ}C$ , al 25%, en el momento de la conexión llegando a los  $26^{\circ}C$ , al 100%. La diferencia térmica es de  $2,9^{\circ}C$  entre los consumos máximo y mínimo.

Por último, indicamos que con un solo panel el consumo se reduce a la mitad y las diferencias térmicas entre la planta de arriba y de abajo no son tan heterogéneas como con los dos paneles conectados.

### 5.3.2.1.1.2.. PARTE TRASERA, DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL PUNTO INFERIOR Y SUPERIOR



Gráfica 56. Diferencia térmica zona trasera 95cm, un solo panel.

	$\Delta T = (T_{pot\_max}^a - T_{pot\_min}^a)$	
	Puntos delanteros	Puntos traseros
Planta de arriba	SP03 $\Delta T = 2,9^{\circ}C$	SP04 $\Delta T = 1,4^{\circ}C$
Planta de abajo	SP08 $\Delta T = 2,7^{\circ}C$	SP07 $\Delta T = 1,4^{\circ}C$

Tabla 23. Clasificación de los incrementos térmicos a 95cm, con un panel conectado, ensayo n°3.

En la siguiente gráfica (gráfica 56) ocurre lo mismo que en la anterior (gráfica 55). Aunque, las temperaturas alcanzadas en las hojas de la planta en este caso son ligeramente menores con respecto a la de los puntos delanteros. Debido, a que en estas hojas la radiación infrarroja transmitida por el panel tiene que pasar una serie



de obstáculos en su camino hasta llegar a calentar las hojas traseras. Además la diferencia de temperatura entre la potencia mínima y máxima de un mismo punto no es tan elevada como pasa con los puntos delanteros.

	$\Delta T = (T_{pot\_max}^a - T_{pot\_min}^a)$	
	Planta de arriba	Planta de abajo
2 Paneles	SP04 $\Delta T = 1,7^{\circ}C$	SP02 $\Delta T = 1,4^{\circ}C$
1 Panel	SP04 $\Delta T = 1,4^{\circ}C$	SP07 $\Delta T = 1,4^{\circ}C$

Tabla 24. Clasificación de las diferencias térmicas de la planta a 95cm de la parte trasera con un panel y ambos paneles, ensayo nº3.

Puntualizamos que en el mismo ensayo pero con los paneles conectados conjuntamente la diferencia térmica entre la potencia máxima y mínima no es tan dispar para tener un consumo del doble. Por ejemplo, el punto SP04 en el ensayo con un solo panel su diferencia térmica es de  $1,4^{\circ}C$ , en cambio con ambos paneles es de  $1,7^{\circ}C$ .

### 5.3.2.1.2. A 220cm CONTRASTE TÉRMICO ENTRE LA ZONA DELANTERA Y TRASERA, SUPERIOR E INFERIOR DE LAS PLANTAS.

A 220cm seleccionaremos los siguientes puntos: SP04, SP09, SP01, SP02. Donde corresponden:

	Punto delantero	Punto trasero
Planta de arriba	SP04	SP01
Planta de abajo	SP09	SP02

Tabla 25. Clasificación de los puntos a 220cm con un panel conectado, ensayo nº5.

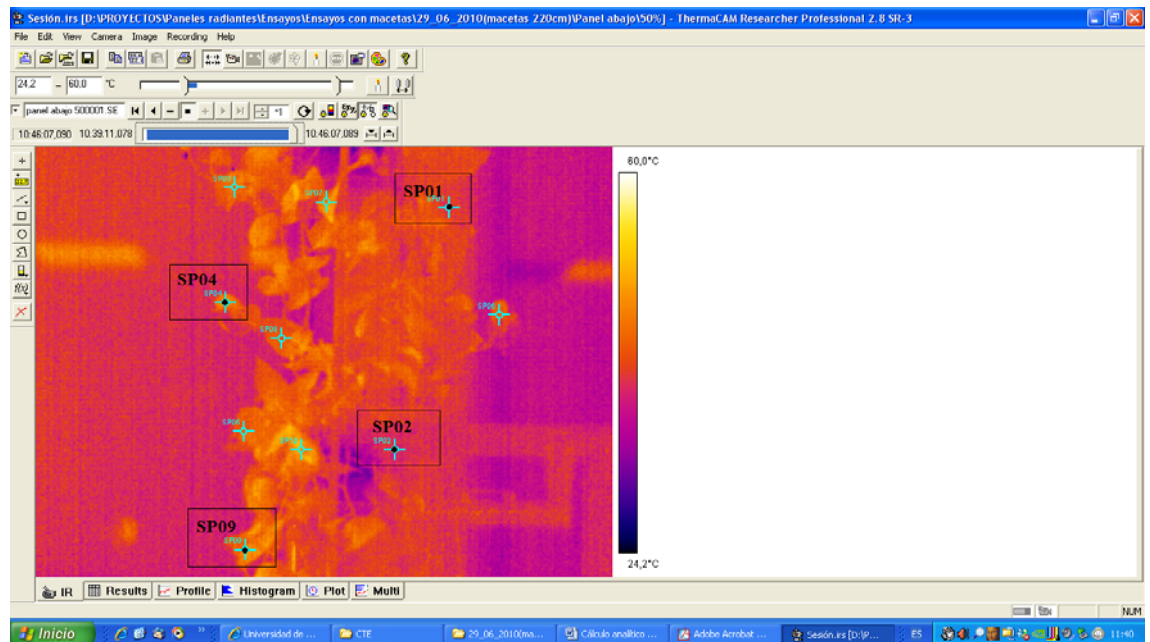
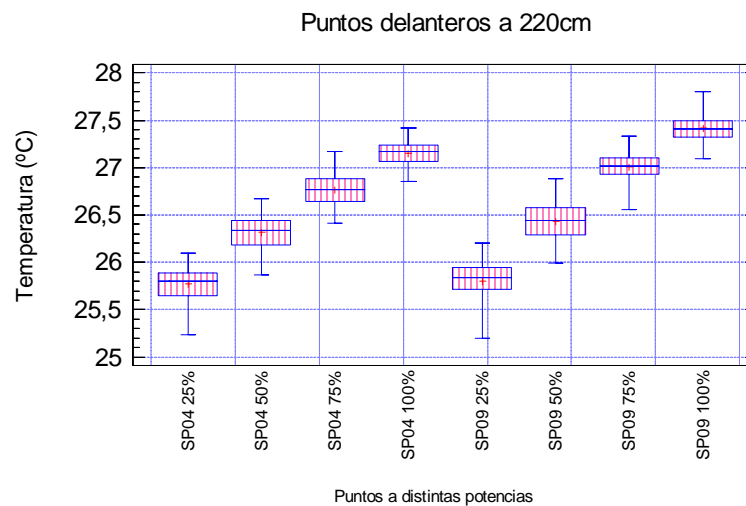


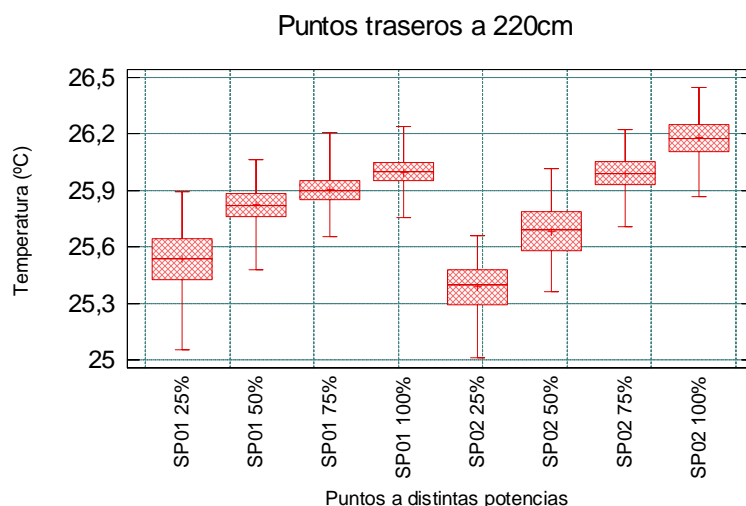
Figura 31. Imagen termográfica ensayo nº3, un panel con regulación.

### 5.3.2.1.2.1.1. PARTE DELANTERA, DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL PUNTO INFERIOR Y SUPERIOR:



Gráfica 57. Diferencia térmica zona delantera 220cm, con un panel conectado.

### 5.3.2.1.2.1.2. PARTE DE DETRÁS, DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL PUNTO INFERIOR Y SUPERIOR:



Gráfica 58. Diferencia térmica zona trasera 220cm, con un panel conectado.

	$\Delta T = (T_{pot\_max}^a - T_{pot\_min}^a)$	
	Puntos delanteros	Puntos traseros
Planta de arriba	SP04 $\Delta T = 2,1^{\circ}C$	SP01 $\Delta T = 1,7^{\circ}C$
Planta de abajo	SP09 $\Delta T = 1,7^{\circ}C$	SP02 $\Delta T = 1^{\circ}C$

Tabla 26. Clasificación de los incrementos térmicos a 220cm, con un panel conectado, ensayo n°5.

En este ensayo, las plantas no parten de la misma temperatura que en el ensayo anterior, a 95cm. Se puede corresponder que a la hora de iniciar el ensayo la temperatura de partida, con una potencia del 25% (356W), era unos grados centígrados más alta.

Además, la diferencia térmica existente entre la zona delantera y trasera es de 1°C aproximadamente con una potencia máxima (100%), disminuyendo a potencias menores.



### 5.3.2.1.3. DIFERENCIA TÉRMICA DE LAS DOS POSICIONES A DISTINTAS POTENCIAS.

En este último apartado trataremos la diferencia térmica entre las distintas distancias, a 95cm y 220cm.

	$\Delta T = (T_{pot\_max}^a - T_{pot\_min}^a)$	
	Puntos delanteros	Puntos traseros
Planta a 95cm	SP03 $\Delta T = 2,9^{\circ}C$	SP04 $\Delta T = 1,4^{\circ}C$
Planta a 220cm	SP04 $\Delta T = 2,1^{\circ}C$	SP01 $\Delta T = 1,7^{\circ}C$

Tabla 27. Clasificación de los incrementos térmicos a 95 y 220cm, con un panel conectado.

Un mismo punto, ubicado en el mismo lugar sufre una gran diferencia térmica dependiendo de la distancia y posición. Por ejemplo, haremos alusión a un punto delantero y otro trasero. Delantero; tomaremos el punto SP03 a 95cm, sufre una diferencia de 2,9 °C, desde la potencia mínima hasta la máxima, por el contrario a 220cm es 2,1 °C, el punto correspondiente es el SP04. Traseros; el punto SP04 a 95cm experimenta un incremento de 1,4 °C, y a 220cm la diferencia térmica es de 1,7 °C desde la potencia mínima hasta la máxima, perteneciente al punto SP01.

Terminamos puntualizando que los incrementos térmicos a 95cm son bastante más dispares entre la zona delantera y trasera de la planta. No obstante, a 220cm el contraste térmico es menor entre ambas zonas. Por lo que la planta recibe el calor de forma más homogénea, siendo éste uno de los principales objetivos a cumplir.

### Plantas a 95cm.

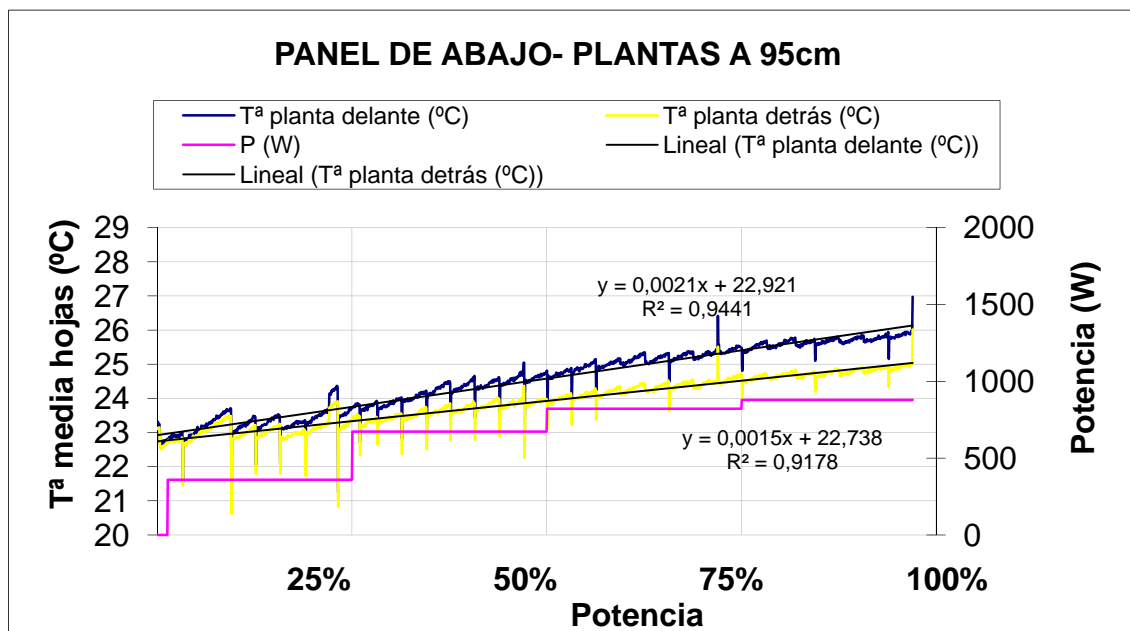


Gráfico 59. Diferencias térmicas entre ambas zonas.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>La cámara se tiene que calibrar cada cierto tiempo, esto lo puede hacer de forma automática o manual. En este ensayo se hizo de forma automática y los tiempos entre estas calibraciones no eran lo suficientemente pequeños por lo que se ven esa serie de saltos térmicos, en posteriores ensayos ya se utilizó de forma manual en intervalos de tiempo más cortos.



### Plantas a 220cm.

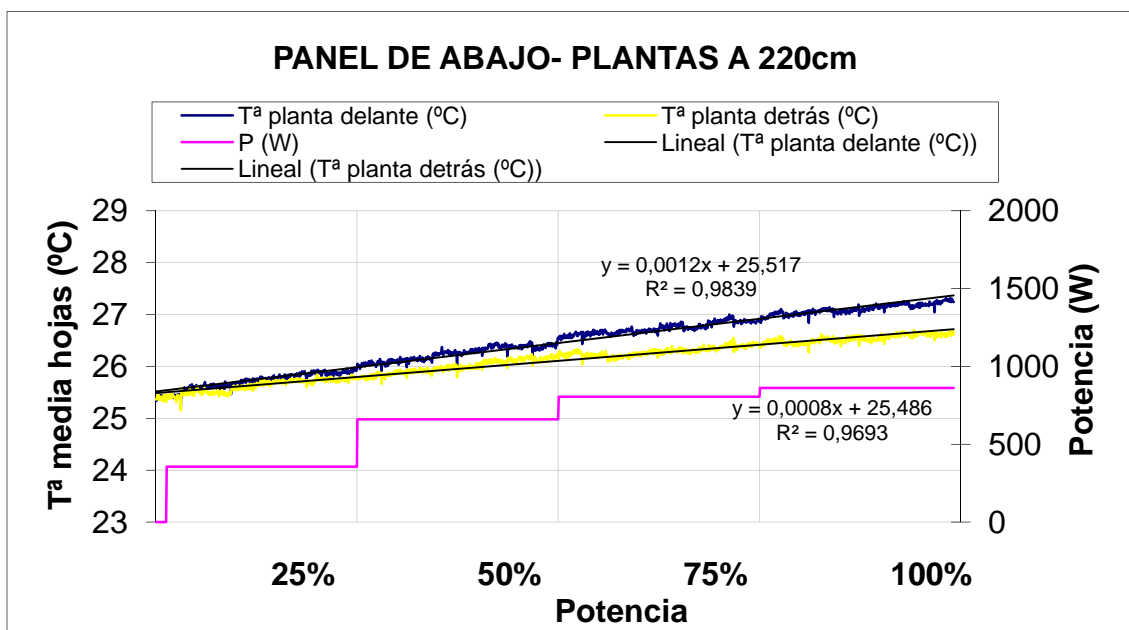


Gráfico 60. Diferencias térmicas entre ambas zonas.

Gráficamente destacamos que a 95cm (gráfica 59) la diferencia térmica entre ambas zonas va aumentando conforme se va modificando la potencia en orden ascendente, siendo su crecimiento térmico proporcional a la potencia. Por cada 1°C que aumenta la zona delantera la trasera acrecienta 0,5 °C.

A una distancia de 220cm (gráfica 60) el contraste térmico entre ambas zonas es menos acusado puesto que por cada 0,5°C que aumenta la zona trasera la delantera incrementa su temperatura 0,75°C.

Finalizamos afirmando, que la distancia de 220cm con un solo panel en funcionamiento sería la posición más adecuada para situar el panel con respecto a las plantas. Es a dicha distancia donde la energía calorífica se reparte de la forma más homogénea a todas las zonas de las plantas, puesto que la temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica, el crecimiento y el desarrollo de los vegetales.

Además, especificamos que debe existir esa homogeneidad térmica, para poder optimizar el aporte de calor a las plantas, buscando la mayor eficiencia desde el punto de vista energético y productivo.

La eficiencia de los sistemas de calefacción en las condiciones descritas no da lugar a resultados determinantes ya que no han sido ensayados en el invernadero. En invernadero, a la hora de instalarlos sería interesante valorar la inversión necesaria y la vida útil de cada panel.



#### 5.4. CONCLUSIONES DISCUSIÓN.

---

La utilización de sistemas de calefacción permite el adecuado crecimiento y desarrollo de los cultivos, programar la obtención de cosechas, obtener incrementos notables sobre la producción y evitar el deterioro precoz de las plantas.

Los resultados esperados de los paneles radiantes MN evaluados a lo largo de todo este proyecto monográfico han sido muy favorables. Ya que pudimos constatar que la inercia térmica en estos sistemas es directamente proporcional a la potencia instalada. Además, poseen una inercia térmica muy baja, aparte de que son eficientes, puesto que el tiempo de respuesta es rápido en comparación con la energía que consumen. Otras ventajas que también se pueden destacar, son sus mínimas dimensiones que conlleva a una rápida instalación. Debemos de tener en cuenta la regulación del consumo además de su radio de acción.

A pesar de todas estas ventajas los paneles no son viables a la hora de instalarlos en un invernadero, ya que tendríamos que colocarlos entre líneas de cultivo. Considerando que habría que ubicar dos paneles en cada línea. Lo que supondría un incremento en el número de paneles, lo que nos conllevaría a una gran inversión inicial. Teniendo en cuenta que la luz es un factor climático indispensable para las plantas, nunca podríamos instalar los paneles MN ya que le proporcionaríamos al cultivo una gran zona de sombreado, siendo perjudicial. Puesto que la luminosidad interviene en la fotosíntesis y en el fotoperiodismo (influencia que tiene la duración del día solar en la floración de los vegetales); también en el fototropismo, en el crecimiento de los tejidos, en la floración y en la maduración de los frutos (Z. Serrano, 1994).

Otra desventaja importante a matizar es la zona de sombreado. Ya que, puede haber una gran diferencia térmica entre las hojas que están frente al panel y las que se sitúan detrás de ellas. Puesto que la energía calorífica tiene que sobrepasar una serie de obstáculos para transmitir el calor a las hojas de detrás. Lo que supondría grandes incrementos de temperatura en una misma planta desfavoreciendo su metabolismo.

La instalación de los paneles radiantes en un invernadero implicaría colocarlos a una distancia de 220cm con respecto al cultivo, para que la inercia térmica se distribuya de la manera más homogénea. Todo ello conllevaría a colocar la distancia entre líneas de cultivo a unos 440cm, suponiendo una gran pérdida de espacio en el invernadero. Ya que en uno convencional la distancia entre líneas es de entre 0,80 y 120cm.

Otra posibilidad a tener en cuenta, sería instalarlos suspendidos en el techo del invernadero a unos 220cm de altura sobre el cultivo. Además, también se tendría



que instalar un mecanismo adecuado a las necesidades a cumplir para proporcionarles movilidad, puesto que cuando la temperatura alcanzara valores críticos estos se desplegaran y mientras tanto se mantuvieran acoplados unos con otros en los laterales del invernadero. Ésta opción sería inviable, porque además de la costosa inversión inicial, se deberían construir invernaderos muy altos desencadenando otros problemas.

Está claro que con calefacción vamos a obtener un mejor control ambiental, que se traducirá en una mejora del desarrollo del cultivo, de su sanidad, producción en cantidad, uniformidad y su calidad ampliamente considerada. Lo que no quiere decir que todo ello por si mismo signifique un aumento de la rentabilidad de la explotación.

Finalmente, estudiando las ventajas y desventajas de este sistema de calefacción, sería relevante orientar sus estudios, sobre todo en semilleros, específicamente en bandejas y en la parte cenital de las mesas.



## **6. CONCLUSIONES.**



### 6.1. CONCLUSIONES.

---

De los resultados obtenidos en este Proyecto Fin de Carrera podemos extraer las siguientes conclusiones generales:

1°. El equipo de calefacción ensayado presenta una baja inercia térmica, que además es proporcional a la potencia instalada.

2°. Poseen un tiempo de respuesta rápido y un bajo consumo energético, por lo que son eficientes.

3°. Tienen una simple instalación debido a sus mínimas dimensiones, aunque su aplicación a invernaderos comerciales está comprometida por el sombreado que provocarían y por elevado número de paneles a instalar.



## **7. BIBLIOGRAFÍA.**



### **7.1. Bibliografía.**

---

Abdel- Ghany, A.M. y Kozai, T. 2006. – Cooling efficiency of fogging systems for greenhouses. *Biosystems Engineering*, 94 (91): 97- 109.

ASAE, 1981. –Heating, ventilating and cooling greenhouses. *Agricultural engineers yearbook*, ASAE Engineering Practice, 406: 401- 404.

Bailey B.J., Ellis R.G. 1989. The potential for using combined heat and power in greenhouses. *Divisional Note 1523*. AFRC Institute of Engineering Research, Silsoe.

Bailey, B.J. 2000. – Constrains, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation. *Acta Horticulturae*, 534: 21- 30.

Baille, A., Kittas, C. y Katsoulas, N. 2001. -Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107: 293- 306.

Benavente R.M., García J.L., Pastor M., Luna L., Oliveria C.E.L. 2001. Calefacción y ahorro energético en invernaderos. *Horticul.*, 151: 18-26.

Bordes P., 1992. – Les plastiques et la maîtrise du climat en productions végétales: Bases générales. Dans: *Les plastiques en agriculture*. Ed. CPA, PHM. París.



**Bibliografía**

---

Boulard T., Baille A., Lagier J. y Memier M., 1989. - Water vapour transfers and dehumidification in a inflatable plastic greenhouse. *Acta Horticulturae*, 245: 462- 469.

Castilla N. 1995. El cultivo en invernadero en el área mediterránea: Consideraciones sobre su evolución, nivel tecnológico y estrategias de producción. *Actas del I Simposium Ibero- americano sobre Aplicación de los Plásticos en las tecnologías Agrarias*. Almería. 375- 383.

Castilla N., 2005. – Los invernaderos de plástico. *Acta horticulturae*.

Cobos J.J. y López J.C., 1998. – Filmes plásticos como material de cubierta en invernadero. *Tecnología de invernaderos II*.

González Benavente- García A. y Martínez García P.F., 1981.- Improvement of the thermal environment of the propagation house and its effect on the tomato fruit-set. *Acta Horticulturae*. 115: 301- 307.

González-Real .M, Delmon D., Antonioletti R., Baille A., Sappe G. 1983. Etude comparative de deux systemes de chauffage: aérotheme et thermosiphon. *Aspects énergétiques et microclimatiques*.

Hanan J.J., 1998. – Greenhouse: Advanced technology for protected cultivation. Ed. CRC Press. Boca Raton Florida. USA.

Hernández J., Castilla N. 1999<sup>a</sup>. Invernaderos mediterráneos en España. Nivel tecnológico actual (Parte I). *Horticul.*, 141: 16-24.





**Bibliografía**

---

- Hernández J., Castilla N. 1999b. Los invernaderos mediterráneos en España (Parte II). Prestaciones productivas y costes. *Horticul.*, 140: 35- 38.
- Hernández J., Castilla N. 2000. Los invernaderos mediterráneos en España (Parte III). Paquetes tecnológicos disponibles. *Horticul.*, 142: 37- 39.
- Kamp P.G.H. y Timmerman G.J., 1996. – Computerized environmental control in greenhouses. IPC- Plant. Ede. Netherlands.
- Kozai T., Hayashi M., Suzuki H. y Watanabe I., 1982. –Effects of environmental factor on evapotranspiration of greenhouse cucumber crops in hydroponic culture. *Journal of Agricultural Meteorology*.
- López J.C., P. Lorenzo, Medrano E., Sánchez- Guerrero M.C., Pérez J., Puerto H.M. y Arco M., 2000.- Calefacción de Invernaderos en el Sudeste Español. Caja Rural de Almería.
- López S., Maroto J.V., Juan Bautista A., Pascual B., Alargada J., 2000. Qualitative changes in pepino fruits following preharvest applications of ethephon. *Scientia Horticulturae*.
- López J.C. 2003. Sistemas de calefacción en invernaderos cultivados de judía en el litoral mediterráneo. Tesis doctoral. Depto. Producción Vegetal. E.P.S Univ. De Almería.
- MAPA (MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN) 2004.- Encuesta sobre superficies y rendimientos. Año 2003. MAPA, Madrid.



**Bibliografía**

---

- Matallana A. y Montero J.I., 1995.- Invernaderos. Diseño, construcción y ambientación 2ª Edición.
- Mantallana A. y Montero J.I., 1995. – Invernaderos. Diseño, construcción y climatización. Edit. Mundi- Prensa. Bilbao, 209p.
- ME (MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN), 2003. – Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004- 2012. Secretaria de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la Pequeña y Mediana Empresa, Madrid, 76 pp.
- Meneses J.F. y Monteiro A.A., 1990. – Ducted air heating systems in greenhouses: experimental results. International Symposium on Simple Ventilation and Heating Methods for Greenhouses in Mild Winter Climates. Acta Horticulturae.
- Mills A.F., 1995.- Transferencia de calor. Mcgraw-Hill/Irwin, Nueva York. 932p.
- Mínguez P.L., 1998. Los determinantes microclimáticos de la horticultura en el sur del mediterráneo. Curso Superior de Especialización de Invernaderos II. Eds. Pérez Parra y Cuadrado Gomez I.M., Almería.
- Molina-Aiz F.D., Fatnassi H., Boulard T., Roy J.C. y Valera D.L., 2010.- Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. Computers and Electronics in Agriculture, 72: 69–86.
- Molina-Aiz F.D., Valera D.L. y Álvarez A.J., 2004a.- Using computational fluid dynamics tool to model the internal climate of an Almería-type greenhouse. Acta Horticulturae, 654: 271-278.



**Bibliografía**

---

- Molina-Aiz F.D., Valera D.L. y Álvarez A.J., 2004b.- Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using Computational Fluid Dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125: 33-51.
- Molina F., Valera D.L. y Álvarez A., 2005.- Innovación en la mecanización de la gestión del clima de invernaderos, 201:56-60. Universidad de Almería.
- Molina-Aiz F.D., Valera D.L., Álvarez A. y Arellano M.A., 2003b.- Análisis y optimización de la ventilación de invernaderos mediante Dinámica de Fluidos Computacional. I Congreso Andaluz de Ingenieros Agrónomos. 16, 17 y 18 de octubre, Sevilla. Comunicación Nº 4c-1: 23 pp.
- Molina-Aiz F.D., Valera D.L., Álvarez A.J. y Madueño A., 2006a.- A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: determination of the drag coefficient. *Biosystem Engineering*, 93 (4): 447-457.
- Molina-Aiz F.D., Valera D.L., Gil J., Peña A. y Álvarez A.J., 2004c.- Nuevas tecnologías aplicadas a sistemas de control climático. *Vida Rural*, 199: 54–58.
- Molina-Aiz F.D., Valera D.L., Gil J.A. y Peña A.A., 2005.- Optimisation of Almería-type greenhouse ventilation performance with computational fluid dynamics. *Acta Horticulturae*, 691: 433-440.
- Molina-Aiz F.D., Valera D.L., Peña A., Álvarez A y Arellano M.A., 2003c.- Simulación numérica del flujo de aire y de la distribución de temperatura en invernaderos de Almería. *Actas del 2º Congreso Nacional de Agroingeniería*, Córdoba, AG03-0715, pp. 630-635.



**Bibliografía**

---

- Molina-Aiz F.D., Valera D.L., Peña A.A., Gil J.A. y López A., 2009.- A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry. *Biosystem Engineering*, 104 (2): 224–242.
- Montero J. I., Castilla N., Gutiérrez de Ravé E., Bretones F., 1985. -Climate under plastic in the Almería area. *Acta Horticulture*, 170: 227- 234.
- Montero J.I., Antón., 1994. – Evolución tecnológica de los invernaderos españoles. *Acta Horticulturae*.
- Montero J.I. 1994. Instalaciones y métodos de control climático: Calefacción. In: Curso Superior de Especialización sobre Tecnología de Invernaderos. Eds. Díaz, Alvarez J.R. y Pérez Parra J., Almería.
- Montero J. I., Antón A., Muñoz P. 1998. Fundamentos. Curso Superior de Especialización de Invernaderos II. Eds. Pérez Parra y Cuadrado Gómez I.M., Almería.
- Plaisier H.F., 1991. – L'importance d' écrans LS aluminisés pour la production de tomates poivrons et aubergines en serre non chauffée. *Plasticulture*, 90; 12- 28.
- Rampini G., 1989. – L'evoluzione dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento. *Colture Protette*.
- Raposo. C. 2004. Evaluación experimental y modelización del control de la pantalla térmica en invernaderos. Tesis doctoral. Depto. De Ingeniería Rural. E.T. S. I. A. Univ. De Madrid.



**Bibliografía**

---

- Sanz de Galdeano, J., Uribarri, A., Sábada, S., Aguado, G. y del Castillo, J. 2003.- Invernaderos y calefacción en Navarra. Navarra Agraria, Nov.- Dic., 13-23.
- Teitel M., Shklyar A., Segal I. y Barak M., 1996.- Effects of nonsteady hot- wáter greenhouse heating on heat transfer and microclimate. J. Agric. Engng Res., 65: 297- 304.
- Teitel M., Peiper U.M. y Zvieli Y., 1997.- Pantallas de aluminio para la prevención de heladas. Horticultura, 125: 112-114.
- Teitel M., Segal I., Shklyar A., Barak M. 1999. A comparasion between pipe and air heatind methods for greenhouses. J. Agric. Eng. Res., 72: 259- 273.
- Tognoni, F. 1990. Effects of stressful and unstressful low temperatura on vegetable crops: Morphological and physiological aspects. Acta Horticultraue, 287: 67- 71.
- Urban L., 1997. – Introduction a la production sous serre: La gestión du climat (Tomo 1). Ed. Tec.- Doc. París., 1997.
- Valera D.L., Molina F.D. y Gil J.A., 1999.- Los invernaderos de Almería: Tipología y mecanización del clima. Ciencia y tecnología, 55: 76- 78. Universidad de Almería.
- Valera D.L., Molina F.D. y Gil J.A., 2001. – Las mallas como técnica de control climático en invernaderos. Vida rural, nov: 50-52.



**Bibliografía**

---

- Valera D.L., Madrueño A., Molina Aíz F.D. y Álvarez A.J.: “Controles electrónicos en invernaderos”. Vida Rural, 179, 2003; pp. 58-61.
- Valera, D.L. 2006. Control climático en invernaderos. Servicios de Publicaciones de la Universidad de Almería, Almería, 516 pp.
- Valera D.L., Molina F.D., Álvarez A.J., Peña A. y López A. 2007.-Avance en la mecanización de invernaderos para el ahorro del consumo energético. Vida Rural, 45:70- 75. Universidad de Almería.
- Valera D.L., Molina- Aíz F.D. y Álvarez A.J., 2008. Ahorro y eficiencia energética en invernaderos. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Serie: Eficiencia energética en la Agricultura 7. Madrid, 64pp.
- Valera D.L. Molina- Aíz F.D. y Álvarez A.J., 2008. – Protocolo de Auditoría Energética en Invernaderos. Auditoría Energética de un invernadero de flor cortada en Mendigorría. Instituto para la Diversificación Y Ahorro de la energía (IDEA), Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Serie: Eficiencia y ahorro energético en la Agricultura 8. Madrid, 56 pp.
- Valera D.L., Molina F.D., López A. y Peña A. 2010.- Eficiencia energética en invernaderos mediterráneos. Vida Rural, 72:30-33. Universidad de Almería.
- Van de Braak N.J. 1995. Greenhouse construction and equipment: Heating equipment. In: Greenhouse Climate Control. An Integrated Approach. Eds. Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H., Van de Braak N.J. Wageningen Pers, Wageningen.



Bibliografía

---

Verlode H. 1990. Protected cultivation in the mediterranean climate. Greenhouses in Cyprus. FAO.

Z. Serrano. *Construcción de Invernaderos*. Mundiprensa, 1994.