



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA:

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN
DE UNA VENTANA
INFRARROJA EN EL RANGO DE
LONGITUD DE ONDA LARGA
QUE PERMITA LA INSPECCIÓN
DE COMPONENTES
POTENCIALMENTE
PELIGROSOS**

AUTOR: RUBÉN TRUJILLO DE CELIS

TUTOR: RAFAEL ROYO PASTOR

COTUTOR: JOSE CARLOS RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

Curso Académico: 2018-19

AGRADECIMIENTOS

De primera mano, me gustaría agradecer a Rafael Royo Pastor y a Jose Carlos Rodríguez Hernández la oportunidad de realizar este proyecto, y por toda la ayuda que me han prestado durante el desarrollo del mismo.

Asimismo, quiero agradecer a los demás profesores del departamento que se han interesado y me han ayudado en el proyecto: Marta, Laura, Ana, Ricardo y Pilar. Sin su inestimable apoyo, este documento no habría sido el mismo.

Por último, no puedo olvidarme de mi familia y de mis amigos. Sin su apoyo, tanto en el trabajo como moralmente, jamás habría podido finalizar este proyecto satisfactoriamente.

RESUMEN

Hoy en día, ante la gran cantidad de campos de estudio y de controles de calidad, se precisan métodos de análisis rápidos que proporcionen resultados fiables, con la menor cantidad de recursos consumidos durante el proceso. Por esta razón, para el estudio de propiedades térmicas de distintos materiales y procesos, destaca el uso de las cámaras termográficas, que permiten visualizar rápidamente los campos de temperatura sobre la superficie de los objetos, basándose en el flujo de calor que emiten por radiación.

Dicha radiación es infrarroja, es decir, la energía se distribuye por el espacio en forma de ondas electromagnéticas con una longitud de onda que abarca mayoritariamente el espectro infrarrojo (entre 780 nm y 1 mm). Por esa razón, si se usan cristales transparentes a dicha radiación, podrían realizarse estudios seguros y eficaces a través de paneles eléctricos.

Por lo tanto, en este documento se va a estudiar la posibilidad de diseñar un cristal con propiedades termográficas adecuadas y de su aplicación industrial para la toma de datos mediante una cámara térmica.

Palabras clave: Cámara infrarroja, cristal termográfico.

RESUM

Hui en dia, davant de la gran quantitat de camps d'estudi i de controls de qualitat, fan falta mètodes d'anàlisis ràpides que proporcionen resultats fiables, amb la menor quantitat de recursos consumits durant el procés. Per esta raó, per a l'estudi de propietats tèrmiques de distints materials i processos, destaca l'ús de les cambres termogràfiques, que permeten visualitzar ràpidament els camps de temperatura sobre la superfície dels objectes, basant-se en el flux de calor que emeten per radiació.

La dita radiació és infraroja, és a dir, l'energia es distribuïx per l'espai en forma d'ones electromagnètiques amb una longitud d'ona que comprén majoritàriament l'espectre infraroig (entre 780 nm i 1 mm) . Per eixa raó, si s'usen vidres transparents a la dita radiació, podrien realitzar-se estudis segurs i eficaços a través de panells elèctrics.

Per tant, en este document es va a estudiar la possibilitat de dissenyar un vidre amb propietats termogràfiques adequades i de la seua aplicació industrial per a la presa de dades per mitjà d'una cambra tèrmica.

Paraules clau: Cambra infraroja, vidre termogràfico.

ABSTRACT

Nowadays, given the high amount of research fields and quality controls, more fast analysis techniques are required so they provide reliable results, at a limited quantity of resources consumed during the process. For this reason, in order to study the thermic properties of many materials and processes, thermographic cameras stand out. That is, these cameras allow the operator to rapidly visualize fields of temperature among the surface of the studied objects, basing on the heat flow they emit by radiation.

This radiation is infrared. This means that energy travels through space by electromagnetic waves, showing a wave length between 780 nm and 1 mm. Owing to that, safer and more efficient electric panels researches would take place if transparent glasses were used as protection.

So, in this document, the possibility of designing a glass with better thermographic properties is carried out, alongside its industrial application for data measuring by means of a thermic camera.

Keywords: infrared camera, thermographic glass.

ÍNDICE DEL PROYECTO

Documentos contenidos en el TFG

- Memoria.
- Anejos de la memoria y planos.
- Presupuesto.

Índice de la Memoria

1	Antecedentes.	16
1.1	El amplio campo de la termografía infrarroja.....	16
1.2	La necesidad de una ventana infrarroja.	16
1.3	El concepto de ventana infrarroja. Clasificaciones.	17
1.4	Modelos comerciales en el mercado actual.....	19
1.5	La necesidad de una nueva ventana infrarroja.	21
2	Alcance y objetivos.	22
3	Introducción teórica.	23
3.1	Bases de la termografía infrarroja.....	23
3.2	Parámetros a regular durante la obtención de termografías.	25
3.3	El parámetro del campo de visión.....	25
3.4	La propiedad de la transmisividad.	27
3.5	Método de medida de la transmisividad.....	28
4	Transmisividad de cristales de sales a distintas temperaturas.....	29
5	Recubrimiento con material polimérico.	35
5.1	Selección del material polimérico en base a sus propiedades ópticas.....	35
5.2	Recubrimiento de la lente con Parafilm®.	38
5.3	Recubrimiento de la lente con lámina de Polietileno de baja densidad.	40
5.4	Recubrimiento de la lente con cinta adhesiva.	42
5.5	Evaluación de los distintos recubrimientos.	44
5.6	Capacidad de protección de la humedad del recubrimiento.....	45
6	Influencia del espesor.....	49
6.1	Influencia del espesor en el cristal de cloruro sódico.....	50
6.2	Influencia del espesor en el material de recubrimiento.....	55
7	Aplicación a un diseño de una ventana infrarroja funcional.	57
7.1	Parámetros de diseño de la ventana infrarroja.	57
7.2	Evaluación de las propiedades del diseño de la ventana infrarroja.....	62
7.3	Etiquetado.....	64
7.4	Certificaciones y estándares.	65
7.5	Mantenimiento de la ventana infrarroja.....	65
7.6	Análisis económico del diseño.	66
8	Conclusiones generales del proyecto.	69
9	Avances futuros.....	71
10	Bibliografía.....	72

Anejos de la Memoria

FIGURAS

Figura 1. Ondas electromagnéticas más comunes. Fuente: (1).	23
Figura 2. Región del infrarrojo térmico y sus adyacentes. Fuente: (1).....	24
Figura 3. La radiación térmica en el espectro electromagnético. Fuente: (3).....	25
Figura 4. Calculo del FOV estándar de una cámara termográfica, estableciendo el ángulo de visión fijo. Fuente: (Robinson, 2010).....	26
Figura 5. Esquema de representación del FOV para un ángulo de medida variable. Fuente: (Robinson, 2010).	26
Figura 6. Resumen de espectros de transmisión típicos para placas de 1 mm de espesor de varios materiales que son utilizados en la región espectral MW IR. Fuente: (Möllmann, 2010). .	29
Figura 7. Montaje experimental para la medida de transmisividades.	31
Figura 8. Transmisividad a distintas temperaturas de los cristales correspondientes al ensayo nº1.....	33
Figura 9. Transmisividad a distintas temperaturas de los cristales correspondientes al ensayo nº2.....	34
Figura 10. Resultados del ensayo de cálculo de la transmisividad a distintas temperaturas para el NaCl recubierto con Parafilm, a T ambiente de 23,5 °C y HR del 4%.	39
Figura 11. Resultados del ensayo para el cálculo de la transmisividad a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Polietileno, a T ambiente de 23,5 °C y HR del 3%...41	
Figura 12. Resultados del ensayo para el cálculo de la transmisividad a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Cinta adhesiva, a T ambiente de 23,7 °C y HR del 4%.	43
Figura 13. Transmisividad a distintas temperaturas de los distintos recubrimientos estudiados.	44
Figura 14. Espectros de transmisión en función del espesor para placas de 1 y 5 mm de BaF ₂ . 49	
Figura 15. Resultados del ensayo para el cálculo de la transmisividad a distintas temperaturas para el cristal de NaCl de 8 mm, a T ambiente de 23,7 °C y HR del 3%.	51
Figura 16. Comparativa entre transmisividades a distintas temperaturas para dos lentes de NaCl de distinto espesor.....	51
Figura 17. Gráfico de las medidas de transmisividad de cristales de NaCl de diferentes espesores, a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%. 53	

Figura 18. Transmisividad de cristales de NaCl de diferentes espesores, a temperatura constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%, con el respectivo ajuste exponencial, tanto gráfico como paramétrico.....	54
Figura 19. Gráfico de las medidas de transmisividad para una lente de cloruro sódico con recubrimiento de Parafilm de varios espesores, a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%.	55
Figura 20. Gráfico de las medidas de transmisividad para una lente de cloruro sódico con recubrimiento de Parafilm de varios espesores, a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%, con el respectivo ajuste exponencial, tanto gráficamente como paramétricamente.....	56
Figura 21. Despiece de la ventana infrarroja diseñada.	61
Figura 22. Ejemplo de etiqueta para el diseño de la ventana infrarroja.	64

TABLAS

Tabla 1. Materiales más comunes en la fabricación de ventanas infrarrojas y algunas de sus propiedades fundamentales. Fuentes: (Chen, 2018), (Robinson, 2010), (Möllmann, 2010) y (Knight Optical, 2019).....	18
Tabla 2. Modelos comerciales de ventanas infrarrojas más destacables incluyendo información sobre algunos de sus parámetros que los definen. Fuentes: (Álava Ingenieros, 2019), (IRISS Inc, 2019), (Fluke Corporation, 2018), (SOREM SAS, 2003), (CorDEX Instruments, 2018) y (FLIR, 2019).....	20
Tabla 3. FOV para una cámara termográfica estándar a través de una ventana termográfica de varios diámetros, a distintas distancias de la lente. Fuente: (IRISS Inc, 2016).	27
Tabla 4. Parámetros influyentes sobre la transmisividad de los objetos. Fuente: (Möllmann, 2010).	27
Tabla 5. Valores de humedad relativa en el interior de la caja con el tiempo.	30
Tabla 6. Resultados del ensayo nº1 para el cálculo de transmisividades, a temperatura ambiente de 22,3 °C y humedad relativa del 4%.	32
Tabla 7. Resultados del ensayo nº1 para el cálculo de transmisividades, a temperatura ambiente de 23,1 °C y humedad relativa del 3%.	33
Tabla 8. Resultados de los ensayos de transparencia al infrarrojo de diversas muestras preparadas de materiales poliméricos. Fuentes: (Hitachi High Tech Science Corporation, 1995), (Stratasys, 2007), (Charles E. Wilkes, 2005), (Reinaldo Brito e Dias, 2018), (Natália Navrátilová, 2014), (MatWeb, 2016) y (Ticona: "Engineering Polymers", 2007).	36
Tabla 9. Resultados de las medidas de transmisividades a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Parafilm, a T ambiente de 23,5 °C y HR del 4%.	38

Tabla 10. Resultados de las medidas de transmisividades a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Polietileno, a T ambiente de 23,5 °C y HR del 3%.	40
Tabla 11. Resultados de las medidas de transmisividades a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Cinta adhesiva, a T ambiente de 23,7 °C y HR del 4%.	42
Tabla 12. Espesores de los distintos materiales usados para el recubrimiento del cristal.	44
Tabla 13. Resultados de las medidas de transmisividades a distintas temperaturas para el cristal de NaCl de 8 mm, a T ambiente de 23,7 °C y HR del 3%.	50
Tabla 14. Transmisividad del cristal de NaCl de distintos espesores a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%.	52
Tabla 15. Medidas de transmisividad para una lente de cloruro sódico con recubrimiento de Parafilm de varios espesores, a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%.	55
Tabla 16. Elementos que forman el diseño con sus correspondientes materiales de fabricación.	57
Tabla 17. Precios de las diferentes opciones para los elementos estructurales de la ventana. Fuente: (Spanish Alibaba, 2019).	58
Tabla 18. Elementos identificados que conforman el diseño de la ventana infrarroja.	61
Tabla 19. Transmisividad de la simulación de ventana infrarroja a 35,7 °C, con una temperatura reflejada igual a 25,4 °C y humedad relativa del 3%.	62
Tabla 20. Presupuesto por capítulos correspondiente a la inspección tradicional de un equipo eléctrico.	67
Tabla 21. Resumen del presupuesto correspondiente a la inspección de equipo eléctrico por medio de termografías, de forma tradicional	68
Tabla 22. Presupuesto por capítulos de la mano de obra y equipos empleados para instalar la ventana y realizar la inspección a través de la misma.	136
Tabla 23. Presupuesto por capítulos los materiales empleados en la fabricación e instalación de la ventana infrarroja.	137
Tabla 24. Resumen del presupuesto correspondiente a la instalación del prototipo de ventana infrarroja, junto a la actividad de inspección de equipo eléctrico a su través por medio de termografías.	138

TERMOGRAFÍAS

Termografía 1. Medida de la temperatura de la resistencia a 29,1 °C.	76
Termografía 2. Medida de la transmisividad del NaCl a 29,1 °C.	76

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

Termografía 3. Medida de la temperatura de la resistencia a 46,5 °C.	77
Termografía 4. Medida de la transmisividad del NaCl a 46,5 °C.	77
Termografía 5. Medida de la temperatura de la resistencia a 71,4 °C.	78
Termografía 6. Medida de la transmisividad del NaCl a 71,4 °C.	78
Termografía 7. Medida de la temperatura de la resistencia a 129 °C.	79
Termografía 8. Medida de la transmisividad del NaCl a 129°C.	79
Termografía 9. Medida de la temperatura de la resistencia a 25,5 °C.	80
Termografía 10. Medida de la transmisividad del BaF2 a 25,5°C.	80
Termografía 11. Medida de la temperatura de la resistencia a 47,9 °C.	81
Termografía 12. Medida de la transmisividad del BaF2 a 47,9 °C.	81
Termografía 13. Medida de la temperatura de la resistencia a 66,1 °C.	82
Termografía 14. Medida de la transmisividad del BaF2 a 66,1°C.	82
Termografía 15. Medida de la temperatura de la resistencia a 118 °C.	83
Termografía 16. Medida de la transmisividad del BaF2 a 118°C.	83
Termografía 17. Medida de la temperatura de la resistencia a 29,7 °C.	84
Termografía 18. Medida de la transmisividad del CaF2 a 29,7°C.	84
Termografía 19. Medida de la temperatura de la resistencia a 48,3 °C.	85
Termografía 20. Medida de la transmisividad del CaF2 a 48,3 °C.	85
Termografía 21. Medida de la temperatura de la resistencia a 66,3 °C.	86
Termografía 22. Medida de la transmisividad del CaF2 a 66,3 °C.	86
Termografía 23. Medida de la temperatura de la resistencia a 121 °C.	87
Termografía 24. Medida de la transmisividad del CaF2 a 121°C.	87
Termografía 25. Medida de la temperatura de la resistencia a 25,7 °C.	88
Termografía 26. Medida de la transmisividad del NaCl a 25,7°C.	88
Termografía 27. Medida de la temperatura de la resistencia a 46,5 °C.	89
Termografía 28. Medida de la transmisividad del NaCl a 46,5 °C.	89
Termografía 29. Medida de la temperatura de la resistencia a 71 °C.	90
Termografía 30. Medida de la transmisividad del NaCl a 71°C.	90
Termografía 31. Medida de la temperatura de la resistencia a 99,6 °C.	91
Termografía 32. Medida de la transmisividad del NaCl a 99,6°C.	91

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

Termografía 33. Medida de la temperatura de la resistencia a 30 °C.	92
Termografía 34. Medida de la transmisividad del BaF2 a 30 °C.	92
Termografía 35. Medida de la temperatura de la resistencia a 47,9 °C.	93
Termografía 36. Medida de la transmisividad del BaF2 a 47,9 °C.	93
Termografía 37. Medida de la temperatura de la resistencia a 53,3 °C.	94
Termografía 38. Medida de la transmisividad del BaF2 a 53,3°C.	94
Termografía 39. Medida de la temperatura de la resistencia a 96,9 °C.	95
Termografía 40. Medida de la transmisividad del BaF2 a 96,9°C.	95
Termografía 41. Medida de la temperatura de la resistencia a 29,5 °C.	96
Termografía 42. Medida de la transmisividad del CaF2 a 29,5°C.	96
Termografía 43. Medida de la temperatura de la resistencia a 48,3 °C.	97
Termografía 44. Medida de la transmisividad del CaF2 a 48,3 °C.....	97
Termografía 45. Medida de la temperatura de la resistencia a 54,5 °C.	98
Termografía 46. Medida de la transmisividad del CaF2 a 54,5°C.	98
Termografía 47. Medida de la temperatura de la resistencia a 97,3 °C.	99
Termografía 48. Medida de la transmisividad del CaF2 a 97,3°C.	99
Termografía 49. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero PVC.....	100
Termografía 50. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero ABS.	100
Termografía 51. Test de opacidad al infrarrojo para la cera de polipropileno.	101
Termografía 52. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero poliestireno.	101
Termografía 53. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero PVA.....	102
Termografía 54. Test de opacidad al infrarrojo para la resina EVA.....	102
Termografía 55. Test de opacidad al infrarrojo para el "Epolene Wax".....	103
Termografía 56. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero PLA.	103
Termografía 57. Test de opacidad al infrarrojo para el "Versaflex CL-2242".....	104
Termografía 58. Test de opacidad al infrarrojo para el Parafilm.	104
Termografía 59. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero policarbonato.....	105
Termografía 60. Test de opacidad al infrarrojo para la placa de polipropileno.	105
Termografía 61. Medida de la temperatura de la resistencia a 27,3 °C.	106
Termografía 62. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 27,3 °C.	106

Termografía 63. Medida de la temperatura de la resistencia a 38 °C.	107
Termografía 64. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 36,1 °C.	107
Termografía 65. Medida de la temperatura de la resistencia a 76,4 °C.	108
Termografía 66. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 76,4 °C.	108
Termografía 67. Medida de la temperatura de la resistencia a 93,3 °C.	109
Termografía 68. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 93,3 °C.	109
Termografía 69. Medida de la temperatura de la resistencia a 98 °C.	110
Termografía 70. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 98 °C.	110
Termografía 71. Medida de la temperatura de la resistencia a 113 °C.	111
Termografía 72. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 113 °C.	111
Termografía 73. Medida de la temperatura de la resistencia a 29,4 °C.	112
Termografía 74. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 29,4 °C. .	112
Termografía 75. Medida de la temperatura de la resistencia a 37,8 °C.	113
Termografía 76. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 37,5 °C. .	113
Termografía 77. Medida de la temperatura de la resistencia a 50,3 °C.	114
Termografía 78. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 50,3 °C. .	114
Termografía 79. Medida de la temperatura de la resistencia a 67,8 °C.	115
Termografía 80. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 67,8 °C. .	115
Termografía 81. Medida de la temperatura de la resistencia a 90,5 °C.	116
Termografía 82. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 90,5 °C. .	116
Termografía 83. Medida de la temperatura de la resistencia a 102 °C.	117
Termografía 84. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 102 °C. .	117
Termografía 85. Medida de la temperatura de la resistencia a 113 °C.	118
Termografía 86. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 113 °C. .	118
Termografía 87. Medida de la temperatura de la resistencia a 26,9 °C.	119
Termografía 88. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Cinta adhesiva a 26,9 °C.	119
Termografía 89. Medida de la temperatura de la resistencia a 40,1 °C.	120
Termografía 90. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Cinta adhesiva a 40,1 °C.	120

Termografía 91. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,2 °C.	121
Termografía 92. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Cinta adhesiva a 70,2 °C.	121
Termografía 93. Medida de la temperatura de la resistencia a 99,9 °C.	122
Termografía 94. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Cinta adhesiva a 99,9 °C.	122
Termografía 95. Medida de la temperatura de la resistencia a 32,1 °C.	123
Termografía 96. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 8 mm a 32,1 °C.	123
Termografía 97. Medida de la temperatura de la resistencia a 46,5 °C.	124
Termografía 98. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 8 mm a 46,5 °C.	124
Termografía 99. Medida de la temperatura de la resistencia a 85,3 °C.	125
Termografía 100. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 8 mm a 85,3 °C.	125
Termografía 101. Medida de la temperatura de la resistencia a 110 °C.	126
Termografía 102. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 8 mm a 110 °C.	126
Termografía 103. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,3 °C.	127
Termografía 104. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 12 mm a 70,3 °C.	127
Termografía 105. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,3 °C.	128
Termografía 106. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 16 mm a 70,3 °C.	128
Termografía 107. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,1 °C.	129
Termografía 108. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl recubierto con 0,44 mm de Parafilm, a 70,1 °C.	129
Termografía 109. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,1 °C.	130
Termografía 110. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl recubierto con 0,66 mm de Parafilm, a 70,1 °C.	130
Termografía 111. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,1 °C.	131
Termografía 112. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl recubierto con 0,88 mm de Parafilm, a 70,1 °C.	131
Termografía 113. Medida de la temperatura de la resistencia a 35,9 °C.	132
Termografía 114. Medida de la transmisividad del sistema que simula el comportamiento del diseño de la ventana infrarroja, a 35,9 °C.	132

ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Termografías que muestran la subida de temperatura en elementos de un cuadro eléctrico a causa de un desequilibrio de cargas. Fuente: (Robinson, 2010).	17
Ilustración 2. Panel de visualización.....	19
Ilustración 3. Parrilla de inspección.	19
Ilustración 4. Puerto de inspección.....	19
Ilustración 5. Diseño del soporte fijo para la medida de transmisividades.....	30
Ilustración 6. Montaje para la medida de transmisividades de las muestras.	31
Ilustración 7. Resultado de la disolución de la grana de polietileno de baja densidad en tolueno tras 20 días.	37
Ilustración 8. Resultado de la disolución de la grana de polipropileno en tolueno tras 20 días.	37
Ilustración 9. Superficie inicial de roca de sal recubierta de lámina de PE.	45
Ilustración 10. Superficie inicial de roca de sal recubierta con Parafilm.....	45
Ilustración 11. Superficie inicial de roca de sal sin recubrir.	46
Ilustración 12. Montaje del ensayo dentro del recipiente, para lograr un ambiente húmedo (alrededor del 80%).....	46
Ilustración 13. Disposición de la lente de cloruro sódico en ambiente cerrado con una humedad relativa del 79%.....	47

DOCUMENTO 1: MEMORIA

1 Antecedentes.

1.1 El amplio campo de la termografía infrarroja.

La termografía infrarroja es una técnica que permite la visualización, medición y análisis de temperaturas de superficie con gran precisión. Esto es gracias a los sensores infrarrojos, que permiten detectar la energía radiante emitida en las superficies a medir, sin contacto y a distancia, a la longitud de onda de trabajo.

Más allá de una simple técnica, la termografía infrarroja (a menudo también llamada de forma breve termografía) es un campo de la ciencia y la industria en muy rápida evolución y con gran número de aplicaciones en ambos campos (Möllmann, 2010). En concreto, se va a hacer hincapié en sus aplicaciones eléctricas.

1.2 La necesidad de una ventana infrarroja.

Según el Real Decreto 614/2001, al trabajar con entornos de alta tensión, como puede ser abrir un cuadro eléctrico, queda terminantemente prohibido abrir dicho cuadro sin ser desconectado y conectado a tierra previamente. Además, en todo trabajo en proximidad de elementos en tensión, el trabajador deberá permanecer fuera de la zona de peligro y lo más alejado de ella que el trabajo permita (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2001).

Por lo tanto, las operaciones de maniobras, medidas, ensayos y verificaciones durante su funcionamiento precisan de un sistema de protección hacia el operario, más allá de su protección personal, ya que la mayoría de aplicaciones eléctricas y sus cálculos de energía incidente sobrepasan los niveles de PPE (equipos de protección personal). En este caso, se plantea la ventana infrarroja como solución al problema: un elemento que ofrezca aislamiento a partir de apantallar el elemento de alta tensión, actuando como barrera ante un posible arco eléctrico. Al no ser necesario retirar cubiertas de equipos energizados, se consigue seguridad para el operario, reducción de tiempos de monitoreo, optimización de recursos y su consiguiente ahorro económico, sin mencionar las ventajas de sistematizar la toma de datos.

Además, para que no quepa ninguna duda, las inspecciones de paneles cerrados usando una ventana infrarroja presenta conformidad con los estándares de OSHA, NFPA y con los mandatos de CSA (Robinson, 2010).

La siguiente imagen muestra un ejemplo que evidencia la importancia de monitorización segura de un cuadro eléctrico haciendo uso de una cámara termográfica a través de una ventana infrarroja:

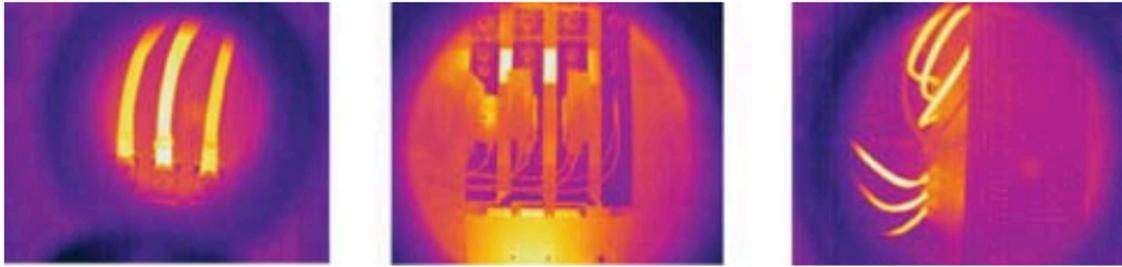


Ilustración 1. Termografías que muestran la subida de temperatura en elementos de un cuadro eléctrico a causa de un desequilibrio de cargas. Fuente: (Robinson, 2010).

1.3 El concepto de ventana infrarroja. Clasificaciones.

¿Qué es una ventana infrarroja? Es aquella cuyas propiedades ópticas permiten el paso de la luz cuya longitud de onda se encuentra dentro del espectro del infrarrojo. De esta forma, permiten la inspección de termografías a través de ellas haciendo uso de una cámara termográfica.

Dependiendo del material o materiales de los que esté fabricada, es posible obtener una gran variedad de ventanas infrarrojas. De esta forma, cada uno de los tipos de ventana será capaz de trabajar en unas condiciones de trabajo determinadas. Por esa razón, resulta conveniente clasificarlas en base a distintos parámetros:

- Según el material de fabricación: existe una gran cantidad de materiales que pueden ser usados de forma satisfactoria para fabricar la ventana infrarroja. No obstante, cada uno de los materiales presenta distintas características que determinarán el campo de aplicación en base a varias de sus propiedades físicas. Las más destacables son: longitud de onda de trabajo, higroscopicidad, grado de reflexión, coste y dureza según la escala de Knoop. A continuación, se presentan los valores de dichas propiedades correspondientes a los materiales más comunes en la fabricación de ventanas infrarrojas (Robinson, 2010):

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

Tabla 1. Materiales más comunes en la fabricación de ventanas infrarrojas y algunas de sus propiedades fundamentales. Fuentes: (Chen, 2018), (Robinson, 2010), (Möllmann, 2010) y (Knight Optical, 2019).

MATERIAL	LONGITUD DE ONDA (μm)	GRADO DE REFLEXIÓN (DOS SUPERFICIES)	DUREZA (ESCALA KNOOP)	HIGROSCOPICIDAD	COSTE
FLUORURO DE CALCIO	0,13 – 10	5%	158	Moderada	Bajo
ZAFIRO	0,15 – 5,5	14%	2000	No	Muy Elevado
POLÍMERO IR	0,15 – 22	21%	N/A	No	Bajo
GERMANIO	1,8 – 23	53%	780	No	Elevado
SELENIURO DE ZINC	0,5 – 22	29%	120	No	Alto
FLUORURO DE BARIO	0,15 – 12,5	7%	82	Moderada	Bajo
CLORURO DE SODIO	0,25 – 18	9%	18,2	Muy elevada	Muy Bajo
SÍLICE IR	0,1 - 26	4%	850	No	Bajo

Dentro de esta clasificación, es posible separar las ventanas en función de la longitud de onda a la que permiten la visualización de las ondas térmicas. Es decir, según las ondas cuya longitud de onda dejan pasar a través de sí: se dividirán en ventanas de onda corta (de 0,9 a 1,7 μm), de onda media (desde 3 a 5 μm) y de onda larga (entre 7 y 14 μm) (Möllmann, 2010).

- Según su sistema de implantación: en función de la manera en que resulta aplicada de forma que apantalle el posible arco eléctrico, las ventanas infrarrojas se dividen según se muestra en la siguiente tabla:

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

Tabla 2. Distintos sistemas de implementación de ventanas infrarrojas presentes en el mercado actual. Fuente: (Robinson, 2010)

SISTEMA DE APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN	ILUSTRACIÓN
PANELES DE VISUALIZACIÓN	Consisten en una ventana equipada con una lente dentro de una carcasa segura.	 <i>Ilustración 2. Panel de visualización.</i>
PARRILLAS DE INSPECCIÓN	Se trata de una ventana equipada con una parrilla o malla en vez de óptico, de forma que permite aplicaciones mecánicas estando abierta.	 <i>Ilustración 3. Parrilla de inspección.</i>
PUERTOS DE INSPECCIÓN	Consisten en pequeños diámetros que pueden estar sellados o cerrados.	 <i>Ilustración 4. Puerto de inspección.</i>

Además de las anteriores metodologías de instalación, es posible recurrir a soluciones personalizadas. Estas disposiciones se llevan a cabo en casos especialmente peligrosos, donde se precise el uso de revestimientos metálicos o de varias conexiones posicionadas en el panel eléctrico. En estos casos, el precio de las ventanas aumenta considerablemente, en función del grado de personalización requerido.

Esta amplia variedad permite el adecuado uso de ventanas infrarrojas en multitud de campos de aplicación y en gran variedad de condiciones específicas.

1.4 Modelos comerciales en el mercado actual.

Una vez expuestas las distintas clasificaciones correspondientes a las ventanas infrarrojas, se debe tener en cuenta los modelos comerciales más destacados. Con esta finalidad, se comparan

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

los fabricantes más prestigiosos según un colegio de ingenieros (Álava Ingenieros, 2019) e industrias a nivel internacional:

Tabla 3. Modelos comerciales de ventanas infrarrojas más destacables incluyendo información sobre algunos de sus parámetros que los definen. Fuentes: (Álava Ingenieros, 2019), (IRISS Inc, 2019), (Fluke Corporation, 2018), (SOREM SAS, 2003), (CorDEX Instruments, 2018) y (FLIR, 2019).

EMPRESA PRODUCTORA	NOMBRE DEL MODELO	MATERIAL DE FABRICACIÓN	LONGITUD DE ONDA DE TRABAJO	PROTECCIÓN CONTRA LA HUMEDAD	PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO	ORDEN DE PRECIOS
IRISS®	Serie VPT®	PolyView System, que se trata de un sistema de polímero reforzado. Se refuerza con carcasa de aluminio.	Desde 3,5 μm a 14 μm .	IP65 / NEMA 4	Medios y altos voltajes.	Desde 138€ (dos pulgadas) hasta 314 € (4 pulgadas).
Fluke Corporation®	Serie CLKT®	Cristal recubierto con CLIRVU®, que es un polímero protector.	Desde 1,1 μm a 13 μm .	IP65	Hasta 50 kA durante 30 ciclos a 60 Hz.	Alrededor de 150 € (dos pulgadas).
SOREM SAS®	Serie H-VIR®	Cristal de sílice fundida, con carcasa de acero inoxidable.	Desde 0,3 μm a 13 μm .	IP67	Medios y altos voltajes (más de 400 V).	Alrededor de 250 € (dos pulgadas).
CorDEX Intruments®	Serie IW®	Cristal de material CorDEX® recubierto con tecnología HydroGARD®.	Desde 0,35 μm a 13 μm .	IP65	Hasta 50 kA a voltajes de 11 kV durante un segundo.	Desde 110€ (1,8 pulgadas) hasta 374 € (3,7 pulgadas).
FLIR®	Serie IRW®	Consta de un cristal de banda ancha con tecnología FLIR® con una cubierta de aluminio anodizado.	Desde 0,3 μm a 13 μm .	IP67	Hasta 63 kA a voltajes de 5 kV durante 30 ciclos a 60 Hz.	Desde 158€ (2 pulgadas) hasta 999 € (24 pulgadas).

En este punto es necesario realizar un inciso: cuando se certifica que una ventana infrarroja es capaz de resistir enormes corrientes a elevadas tensiones (certificado IEEE C37.20.7), realmente es el panel eléctrico el capaz de resistir el arco desviándolo gracias a un conjunto de refuerzos estructurales, planos y puertas de ventilación que desvían la explosión hacia el sentido opuesto donde se encuentra el operario. Es decir, una ventana infrarroja por sí sola no es capaz de resistir la explosión provocada por un arco eléctrico, sino que este certificado indica que la ventana es capaz de resistir la maniobra de desvío sin romperse, modificar su estructura o desalojarse (Robinson, 2010).

De entre todas las empresas fabricantes, aquella de mayor prestigio y líder mundial en la fabricación de ventanas infrarrojas es SOREM SAS®, inventora exclusiva de la tecnología H-VIR®. No obstante, el sistema que mejor relación seguridad-precio posee es la serie IRW® de la productora FLIR®, además de disponer del sistema de implantación más cómodo y sencillo gracias a la tecnología PIRma-Lock.

1.5 La necesidad de una nueva ventana infrarroja.

Una vez se ha inducido en la importancia de un correcto sistema e implantación de una ventana infrarroja para la función indicada, resulta imprescindible disponer de un modelo eficaz y seguro a un coste razonable. No obstante, a la vista de los modelos comerciales recogidos anteriormente en la Tabla 3, se aprecia cómo ésta resulta una tecnología cara, e incluso compleja a la hora de instalarse.

Por esta razón, nace la necesidad de disponer un diseño novedoso y actualizado de una ventana infrarroja de elevadas prestaciones, pero con una particularidad especial: a un coste reducido. De esta forma, se facilitará su implantación en cualquier cuadro eléctrico de viviendas, industrias, etc. Así, se promoverá su implantación en todos estos ámbitos logrando, finalmente, unas condiciones de seguridad idóneas a la hora de inspeccionar cualquier equipo eléctrico, tal y como marca la normativa.

Basándose en las propiedades ópticas de los materiales, el diseño plantea el cloruro sódico como material de fabricación del cristal de la ventana infrarroja. El auténtico problema que conlleva esta decisión es el hecho de que esta sal resulta altamente higroscópica, por lo que va a degradarse si se expone a la humedad del ambiente, perdiendo sus propiedades ópticas en el proceso y llevando el diseño al fracaso simultáneamente. En consecuencia, van a estudiarse otras sales menos higroscópicas como alternativa, además de caracterizar, seleccionar y aplicar un recubrimiento polimérico que evite la degradación a causa de la humedad ambiental y proteja al cristal. Así, la clave resulta en escoger un polímero barato, impermeable y con dignas propiedades ópticas.

2 Alcance y objetivos.

Este proyecto plantea el diseño, caracterización y evaluación de un diseño de una ventana infrarroja de elevadas prestaciones y de precio reducido, basándose en propiedades físicas, químicas y ópticas de los materiales, a partir de la experiencia en el campo de la termografía.

El objetivo de este documento es validar el correcto diseño de un cristal con propiedades termográficas tales que permita el análisis térmico a su través por medio de una cámara infrarroja. Con la finalidad de alcanzar la solución óptima, se han seguido los siguientes pasos:

- Selección del material adecuado, mediante medidas de transmisividad de diversas sales a distintos valores de temperatura.
- Selección de material polimérico en base a sus propiedades ópticas, para la aplicación en una ventana infrarroja.
- Recubrimiento del material más apto con polímeros para lograr la protección frente a agentes externos, sacrificando en menor medida de lo posible las propiedades ópticas de la ventana.
- Análisis de la influencia del espesor sobre las propiedades ópticas, tanto del cristal de la ventana como de su recubrimiento.
- Diseño de todos los parámetros de una ventana infrarroja, así como de todos sus elementos que la conforman, logrando un prototipo de altas prestaciones a un precio reducido, todo basándose en los anteriores ensayos y análisis.

3 Introducción teórica.

3.1 Bases de la termografía infrarroja.

En física, la luz visible, la radiación ultravioleta, la radiación infrarroja, etc pueden ser descritas como ondas (para ser más específico, como ondas electromagnéticas). Las ondas son perturbaciones periódicas caracterizadas por la variable llamada longitud de onda, λ . En la siguiente figura se pueden observar los tipos más comunes atendiendo a dicho factor:

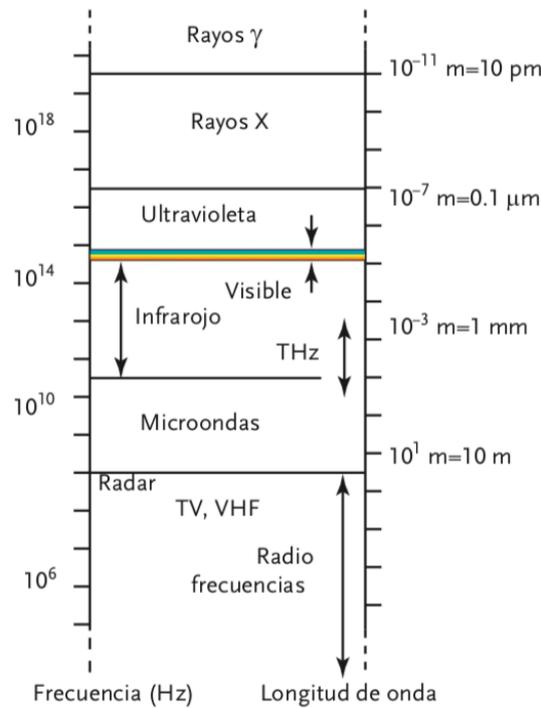


Figura 1. Ondas electromagnéticas más comunes en función de su longitud de onda. Fuente: (Möllmann, 2010).

Por tanto, el rango del espectro visible se encuentra entre longitudes de onda de 380 nm y 780 nm, seguido por el espectro del infrarrojo, con ondas de longitud más larga: entre 780 nm y 1 mm. Por lo tanto, la cámara trabajará dentro de este último espectro. No obstante, tan sólo es necesario trabajar en una gama concreta dentro del infrarrojo para obtener las termografías: dentro del denominado espectro del infrarrojo térmico (Möllmann, 2010). Se puede apreciar esta región en la siguiente figura:

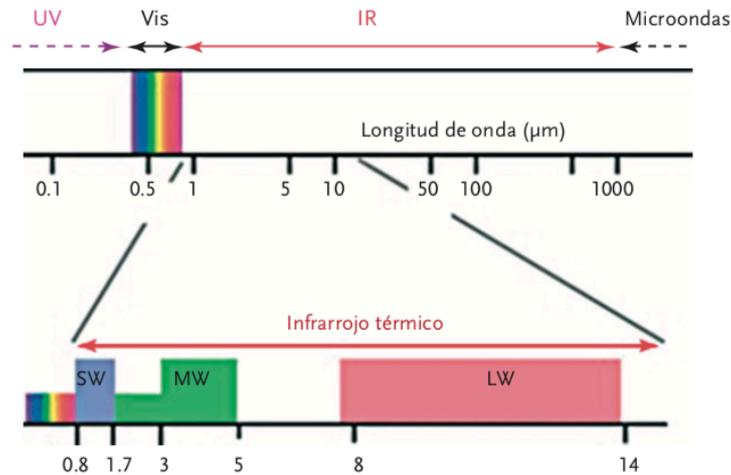


Figura 2. Región del infrarrojo térmico y sus adyacentes. Fuente: (Möllmann, 2010).

Como puede observarse en la Figura 2, las termografías pueden realizarse a 3 rangos de longitud de onda distintos (Möllmann, 2010):

- Onda corta (SW): Se trabaja aquí de 0,9 a 1,7 μm . Son, por tanto, las ondas más energéticas dentro de la región del infrarrojo térmico.
- Onda media (MW): Desde longitudes de onda de 3 a 5 μm .
- Onda larga (LW): Correspondiente a longitudes de entre 7 y 14 μm . Son las ondas menos energéticas.

La energía correspondiente a cada una de estas ondas es directamente proporcional a su frecuencia y, por ende, inversamente proporcional a su longitud de onda, según la relación de Planck-Einstein:

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

Donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia a la que vibra la onda electromagnética.

La cámara es capaz de detectar la radiación infrarroja y obtener una respuesta ante un cambio de tensión o de resistencia eléctrica. Dicha respuesta será asimilada por la placa electrónica, encargada de transformarla en un tono de color característico en función del valor de la señal interpretada. Así, se formará una imagen en pantalla con todos los tonos de color correspondientes a múltiples señales eléctricas: se crea la termografía (Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid., 2011).

Gracias a la ley de Stefan-Boltzmann, no sólo se conoce que todo cuerpo por encima de la temperatura del cero absoluto (0 K) emite calor en forma de radiación electromagnética, sino la dependencia cuadrática de su energía con la temperatura de la superficie del objeto en cuestión, según la siguiente expresión (Robinson, 2010):

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

No obstante, la radiación térmica va desde el ultravioleta al infrarrojo, por lo que no es exclusivo de esta zona (SolidWorks Web Help, 2016), como se puede observar en la Figura 3:

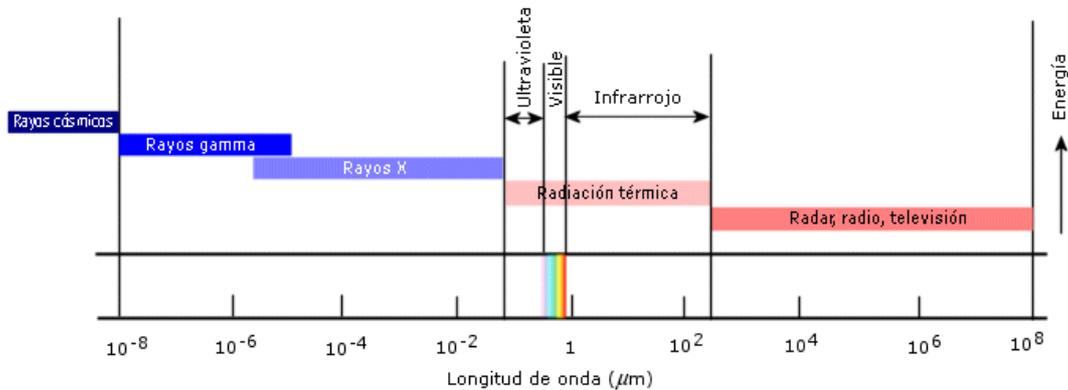


Figura 3. La radiación térmica en el espectro electromagnético. Fuente: (SolidWorks Web Help, 2016).

3.2 Parámetros a regular durante la obtención de termografías.

Una vez detallado el funcionamiento de la cámara infrarroja, deben tenerse en cuenta los parámetros y factores que tienen influencia en las imágenes registradas, los cuales se dividen en 3 grupos en función de cómo afectan a las mismas (Möllmann, 2010):

- **Parámetros que se generan en los datos brutos del detector de la cámara**, que normalmente deben ser ajustados mediante el software controlador de la cámara: Emisividad del objeto, distancia de la cámara al objeto, humedad relativa, temperatura ambiente y temperatura de la óptica.
- **Parámetros que afectan a cómo los datos son representados en la imagen**. Deben escogerse adecuadamente para no perder información crucial al realizar la termografía. Son: la paleta de colores, el campo y rango de temperaturas.
- **Parámetros que se manifiestan durante el proceso de análisis cuantitativo y de interpretación de las imágenes**: Dependencia de transmisividad con longitud de onda, ángulo de observación y con temperatura, propiedades ópticas del material, uso de filtros, reflexiones térmicas, velocidad del viento, carga solar, humedad, efectos de sombra y propiedades térmicas de los objetos.

3.3 El parámetro del campo de visión.

Un parámetro que resulta determinante a la hora de diseñar cristales termográficos y lentes de cámaras infrarrojas es el campo de visión, abreviado comúnmente como FOV. Este término se refiere a la distancia, tanto en vertical como horizontal, a la que una cámara puede registrar imágenes. También se puede expresar como el ángulo que forma con la ventana a través de la cual se toma la imagen, según muestra el siguiente esquema:

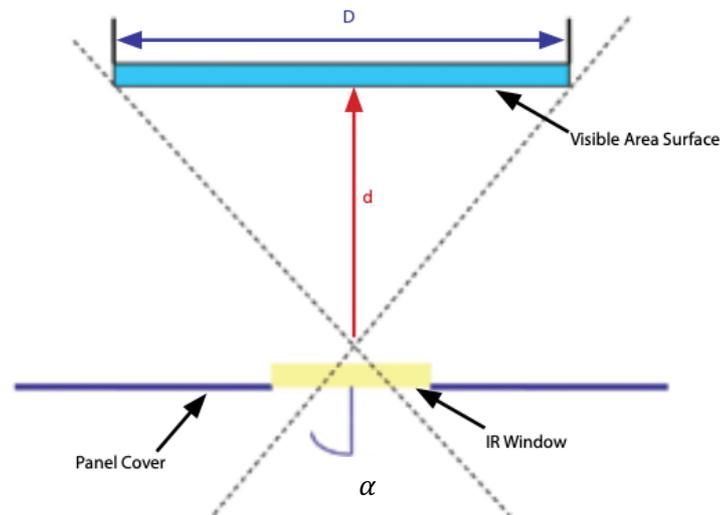


Figura 4. Cálculo del FOV estándar de una cámara termográfica, estableciendo el ángulo de visión fijo. Fuente: (Robinson, 2010).

Por lo tanto, el campo de visión puede calcularse mediante la siguiente igualdad trigonométrica:

$$D = 2 \cdot d \cdot \tan(\alpha) \quad (3)$$

Sin embargo, dado que el operario puede modificar el ángulo de visión, como máximo 30 grados en cada dirección moviendo la cámara, se asume que el FOV estándar es tres veces superior que para el caso en el que se considera un ángulo de visión fijo, como expresa la Ecuación (3). Entonces, la expresión quedaría de la siguiente forma:

$$D = 2 \cdot d \cdot \tan(\alpha) \cdot 3 \quad (4)$$

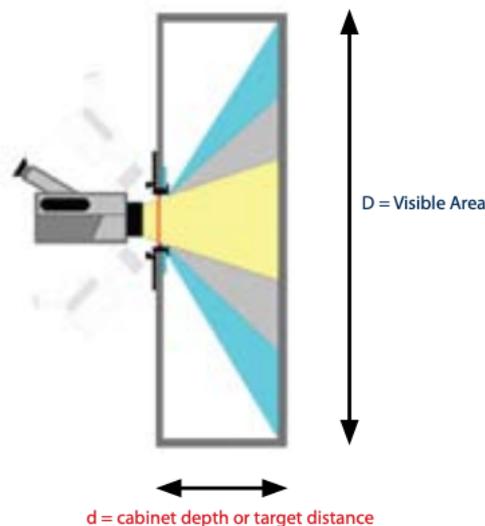


Figura 5. Esquema de representación del FOV para un ángulo de medida variable. Fuente: (Robinson, 2010).

Para una cámara termográfica con una lente de 2 pulgadas de diámetro, los fabricantes proporcionan una tabla estándar con valores de FOV para diversas distancias focales y varios diámetros de ventana infrarroja, asumiendo un ángulo de visualización de 24° y un ángulo máximo de medida de 30°:

Tabla 4. FOV para una cámara termográfica estándar a través de una ventana termográfica de varios diámetros, a distintas distancias de la lente. Fuente: (IRISS Inc, 2016).

DISTANCIA AL OBJETIVO O "D" (IN)	FOV PARA UNA LENTE DE 1,125 PULGADAS (IN)	FOV PARA UNA LENTE DE 3 PULGADAS (IN)	FOV PARA UNA LENTE DE 4 PULGADAS (IN)
8	Hor= 13,2 Ver=9,9	Hor= 16,2 Ver=12,9	Hor= 19,2 Ver=15,9
12	Hor= 18 Ver=13,5	Hor= 21 Ver=16,5	Hor= 24 Ver=19,5
18	Hor= 25 Ver=18,75	Hor= 28 Ver=21,75	Hor= 31 Ver=21,75
24	Hor= 31,5 Ver=24	Hor= 34,5 Ver=27	Hor= 37,5 Ver=30

Como puede observarse en esta tabla, las cámaras termográficas son capaces de capturar más imágenes en el plano horizontal que en el vertical.

Este parámetro será decisivo a la hora de diseñar las medidas de una ventana infrarroja a nivel comercial.

3.4 La propiedad de la transmisividad.

En este punto, es importante resaltar el parámetro de la transmisividad, pues será determinante a la hora de realizar el diseño de la ventana infrarroja. La transmisividad es la proporción de la radiación que incide sobre un cuerpo y que acaba atravesándolo sin ser absorbida ni reflejada (Vecchio, 2003). Por tanto, los materiales elegidos para desarrollar la ventana infrarroja deben poseer un alto grado de transmisividad, pues dejarían pasar mayor cantidad de radiación infrarroja para que sea captada por la cámara.

Esta propiedad depende, a su vez, de otras variables a tener en cuenta:

Tabla 5. Parámetros influyentes sobre la transmisividad de los objetos. Fuente: (Möllmann, 2010).

VARIACIONES POR PROPIEDADES INTRÍNSECAS DEL OBJETO	VARIACIONES DEBIDAS A PARÁMETROS EXTERNOS
Material	Ángulo de observación
Estructura superficial	Longitud de onda
Geometría	Temperatura

A su vez, cabe recalcar la propiedad de la emisividad: la cual no es más que el cociente entre la radiación realmente emitida por la superficie del objeto termografiado y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura (Möllmann, 2010).

La razón por la que esta propiedad es interesante se debe a que a partir de esta variable resulta bastante sencillo hallar la transmisividad de distintos materiales, propiedad imprescindible a la hora de realizar el diseño de la ventana infrarroja.

Según la ley de reflexión, teniendo en cuenta una fracción de radiación incidente:

$$1 = R + \tau + \alpha \quad (5)$$

Donde R , τ y α son, respectivamente, las fracciones de radiación incidente que se reflejan, transmiten y absorben.

Además, la ley de Kirchhoff establece que la fracción de radiación absorbida por un cuerpo es igual a la fracción de radiación emitida (sgcg, 2004):

$$\varepsilon = \alpha \quad (6)$$

Donde ε es el valor de la emisividad del cuerpo, es decir, la fracción de radiación incidente que es emitida.

3.5 Método de medida de la transmisividad.

A la hora de calcular la transmisividad de diversos materiales y sistemas en próximos capítulos, se relata detalladamente cómo calcular dicha propiedad a partir de los distintos valores de emisividades medidos gracias a la cámara infrarroja (American Society For Testing And Materials, 2002):

1. Fijar emisividad a 1,00 y distancia a 0 metros.
2. Medir y fijar la temperatura aparente reflejada. Asegurarse que la muestra a analizar se encuentra a temperatura ambiente o a la temperatura ambiente reflejada. En este caso, se ha decantado por introducir en los parámetros de la cámara una temperatura reflejada igual a la ambiente.
3. Con la emisividad todavía fijada en 1,00, medir la temperatura aparente de una fuente caliente de radiación, en este caso una resistencia eléctrica.
4. Situar la muestra a analizar entre la fuente de radiación y la cámara. Entonces, tomar una imagen. Resulta imprescindible que la temperatura de la fuente de radiación no varíe en este punto.
5. Cambiar el valor de la emisividad hasta que la temperatura iguale a la de la fuente de radiación.
6. El valor de la emisividad obtenido en el anterior punto se corresponde con la transmisividad.

Este método permite realizar ensayos reproducibles para varias temperaturas y para todos los sistemas que vayan a estudiarse.

4 Transmisividad de cristales de sales a distintas temperaturas.

Como se ha explicado en el capítulo 3.4, para encontrar el material adecuado del que estará fabricada la ventana, la elección se basará en la propiedad de la transmisividad. Por lo tanto, este capítulo se basará en encontrar el material cuya transmisividad sea lo suficientemente elevada para permitir la correcta visualización de las termografías. Además, esta propiedad tiene una considerable dependencia con variables externas e internas al material. Por lo tanto, aparte de escoger el correcto material, es necesario establecer las condiciones óptimas de trabajo:

- Mientras que el ángulo de observación entre la lente de la cámara y el objeto no sobrepase los 45° , no se apreciarán cambios en los resultados (Vecchio, 2003). Por esta razón, se intenta que este valor sea cercano a 0° : se observarán los objetos de frente.
- Cada tipo de material presenta un comportamiento distinto frente a la longitud de onda de trabajo (Vecchio, 2003), por lo que el estudio se centrará en onda larga.
- Con la variable de la temperatura sucede lo mismo que para la longitud de onda, por lo que es importante conocer la dependencia de ésta sobre el material, por lo que se realizarán ensayos para diversos valores de temperatura.

Hay una serie de materiales comunes disponibles en la gama espectral del IR térmico. Estos incluyen cristales como BaF_2 , NaCl , Cd , Te , Ga , As , Ge , LiF , MgF_2 , KBr , Si , ZnSe , ZnS o vidrios orgánicos e inorgánicos, como sílice fundida IR. Los materiales pueden ser caracterizados según la gama de longitud de onda donde se utilizan (Möllmann, 2010). A continuación, se muestran los valores de transmisión de distintos cristales de 1 mm de espesor en la región espectral de onda media correspondiente a la zona del infrarrojo:

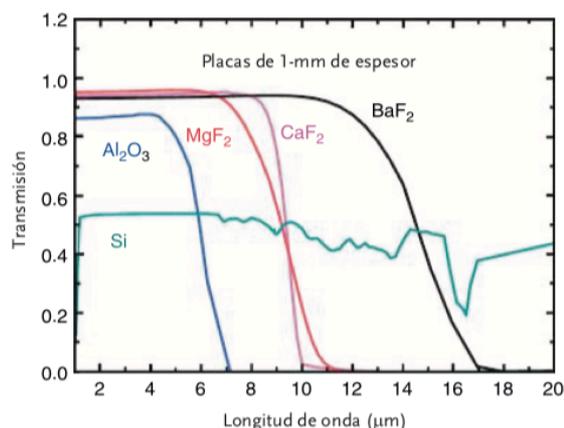


Figura 6. Resumen de espectros de transmisión típicos para placas de 1 mm de espesor de varios materiales que son utilizados en la región espectral MW IR. Fuente: (Möllmann, 2010).

A la vista de la Figura 6, para el desarrollo de las experiencias se partió de 3 sales: NaCl , BaF_2 y CaF_2 , correspondientes a los cristales que presentan mayor transmisividad.

Tradicionalmente, se usaban cristales de CaF_2 y BaF_2 , aunque cuando este último se clasificó como carcinógeno, el CaF_2 se convirtió en favorito, pese a ser higroscópico (Robinson, 2010).

Dado que se trabajó con cristales iónicos higroscópicos (sobre todo el NaCl), resultó crucial disponer de un ambiente seco para no estropear el material, de modo que los ensayos fueran satisfactorios. Así, se decidió trabajar en una caja de metacrilato estanca, con válvula para la extracción de gases y toma eléctrica. Para solucionar el problema de la humedad, de primera mano se optó por el uso de disoluciones saturadas de CsF y de NaOH (Greenspan, 1976), preparadas en laboratorio. No obstante, al implantarse dentro de la caja en cuencos abiertos, la humedad no disminuía sino que incluso podía llegar a aumentar, por lo que la idea se rechazó tras varios días de espera. La solución vino al distribuir sílica gel en placas Petri de poliestireno por todo el interior de la caja. De esta forma se consiguió disminuir la humedad en el ambiente, tal y como indica la siguiente tabla:

Tabla 6. Valores de humedad relativa en el interior de la caja con el tiempo.

TIEMPO (HORAS)	HUMEDAD RELATIVA (%)
0 (INICIO)	79%
10	12%
24	3%

De no conseguir estas condiciones de baja humedad, la lente perdería sus propiedades ópticas de forma drástica progresivamente (DeMonte, 2012).

Los ensayos se realizaron sobre lentes de una pulgada de cada tipo de cristal, sobre un soporte que permita la visualización por la cámara en posición fija, el cual fue diseñado expresamente, y posteriormente fabricado gracias a una impresora 3D:

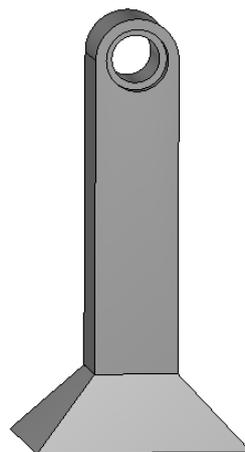


Ilustración 5. Diseño del soporte fijo para la medida de transmisividades.

A continuación, se muestra un esquema del montaje:

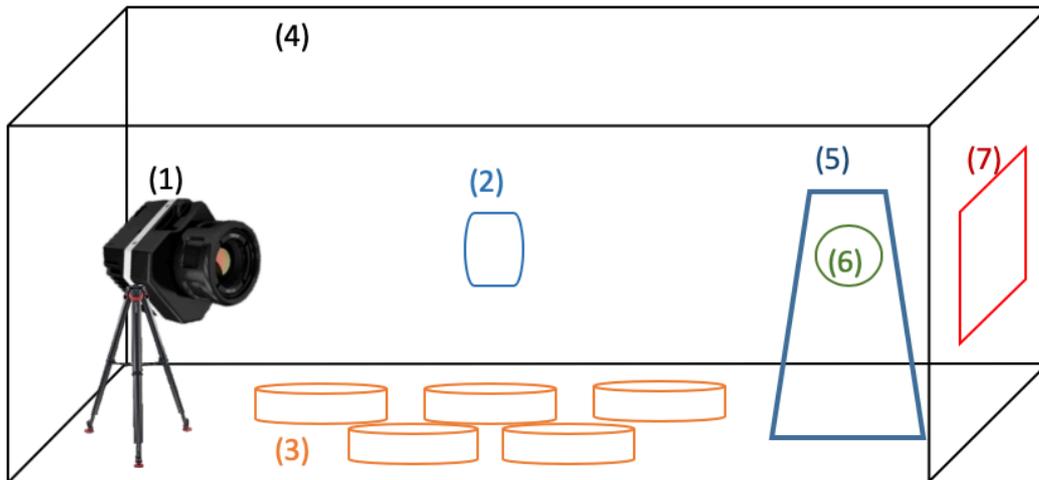


Figura 7. Montaje experimental para la medida de transmisividades.

- (1) Cámara termográfica.
- (2) Sensor de temperatura y humedad relativa.
- (3) Placas Petri de poliestireno con sílica gel.
- (4) Caja estanca de metacrilato.
- (5) Soporte para lentes.
- (6) Lente de cristal de una pulgada.
- (7) Resistencia eléctrica.

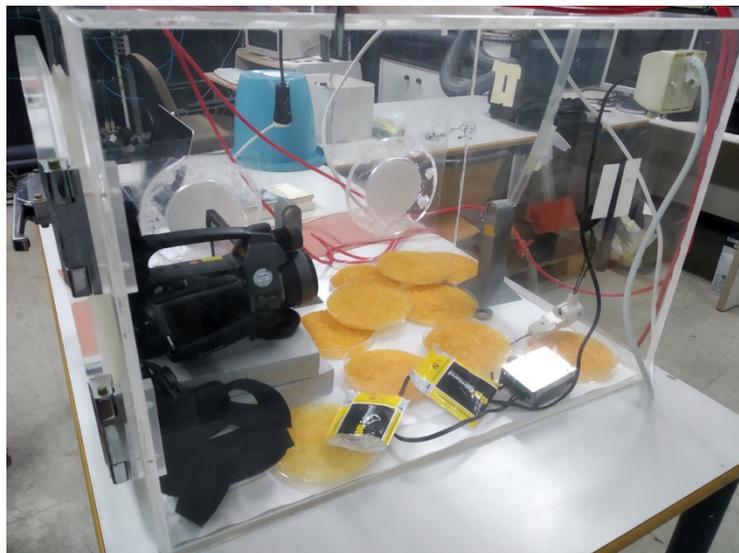


Ilustración 6. Montaje para la medida de transmisividades de las muestras.

La base de la experiencia es tomar imágenes de la resistencia ajustada a diversas temperaturas (entre 20 y 120 °C). Se toma una imagen a través de la lente y otra sin la lente para cada valor de temperatura ajustado. Una vez adquiridos los datos, gracias al programa de análisis de las termografías “ThermaCAM Researcher 2.10 PRO”, se calcula la transmisividad de cada material a cada temperatura. Para ello, se introducen los valores de temperatura reflejada (aproximada a la temperatura ambiente medida por el sensor), humedad relativa y distancia, (la cual será cero), y se sigue el procedimiento descrito en el capítulo 3.5.

En el anexo de termografías pueden observarse las parejas de medidas para cada material y temperatura.

Los resultados de las experiencias se resumen a continuación:

ENSAYO NÚMERO 1

Tabla 7. Resultados del ensayo nº1 para el cálculo de transmisividades, a temperatura ambiente de 22,3 °C y humedad relativa del 4%.

NaCl		BaF2		CaF2	
<i>Tsin</i> (°C)	29,3	<i>Tsin</i> (°C)	25,5	<i>Tsin</i> (°C)	29,9
<i>Tcon</i> (°C)	29,1	<i>Tcon</i> (°C)	25,4	<i>Tcon</i> (°C)	27,4
τ	0,955	τ	0,845	τ	0,535
<i>Tsin</i> (°C)	46,7	<i>Tsin</i> (°C)	46,8	<i>Tsin</i> (°C)	47,8
<i>Tcon</i> (°C)	45,2	<i>Tcon</i> (°C)	43,5	<i>Tcon</i> (°C)	36,6
τ	0,93	τ	0,84	τ	0,52
<i>Tsin</i> (°C)	71,4	<i>Tsin</i> (°C)	65,7	<i>Tsin</i> (°C)	66,2
<i>Tcon</i> (°C)	67,6	<i>Tcon</i> (°C)	59	<i>Tcon</i> (°C)	47
τ	0,904	τ	0,812	τ	0,488
<i>Tsin</i> (°C)	128,6	<i>Tsin</i> (°C)	116,1	<i>Tsin</i> (°C)	119,8
<i>Tcon</i> (°C)	121	<i>Tcon</i> (°C)	104,3	<i>Tcon</i> (°C)	80,7
τ	0,903	τ	0,81	τ	0,5065

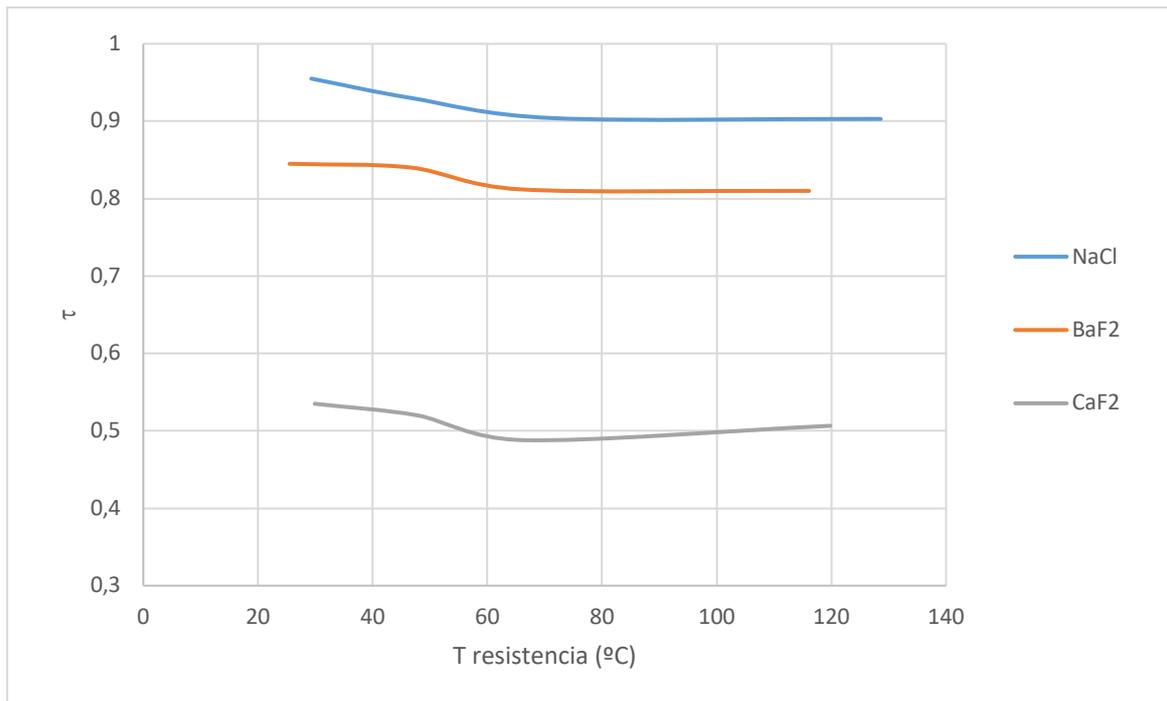


Figura 8. Transmisividad a distintas temperaturas de los cristales correspondientes al ensayo nº1.

ENSAYO NÚMERO 2

Tabla 8. Resultados del ensayo nº1 para el cálculo de transmisividades, a temperatura ambiente de 23,1 °C y humedad relativa del 3%.

NaCl		BaF2		CaF2	
<i>Tsin</i> (°C)	25,7	<i>Tsin</i> (°C)	29,8	<i>Tsin</i> (°C)	29,4
<i>Tcon</i> (°C)	25,7	<i>Tcon</i> (°C)	29	<i>Tcon</i> (°C)	27,7
τ	0,999	τ	0,89	τ	0,56
<i>Tsin</i> (°C)	46,8	<i>Tsin</i> (°C)	47,7	<i>Tsin</i> (°C)	47,9
<i>Tcon</i> (°C)	45,3	<i>Tcon</i> (°C)	44,3	<i>Tcon</i> (°C)	36,7
τ	0,935	τ	0,85	τ	0,532
<i>Tsin</i> (°C)	71,2	<i>Tsin</i> (°C)	53,2	<i>Tsin</i> (°C)	54,4
<i>Tcon</i> (°C)	67,5	<i>Tcon</i> (°C)	48,6	<i>Tcon</i> (°C)	40,4
τ	0,905	τ	0,82	τ	0,488
<i>Tsin</i> (°C)	99,5	<i>Tsin</i> (°C)	96,7	<i>Tsin</i> (°C)	97
<i>Tcon</i> (°C)	94,2	<i>Tcon</i> (°C)	86,2	<i>Tcon</i> (°C)	65,7
τ	0,91	τ	0,818	τ	0,498

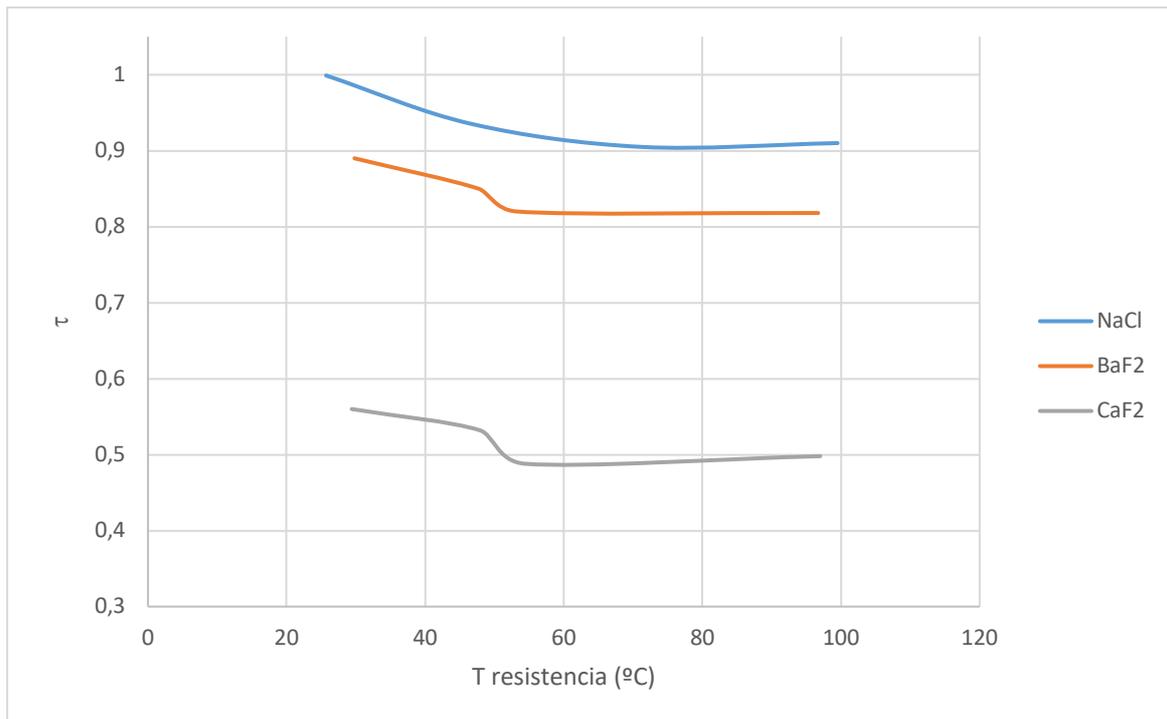


Figura 9. Transmisividad a distintas temperaturas de los cristales correspondientes al ensayo nº2.

A la vista de los resultados de ambos ensayos, se aprecia que claramente el cloruro sódico es el material que presenta una mayor transmisividad, y será a partir del cual se trabajará para lograr el diseño de la ventana infrarroja.

Un concepto que se tratará más adelante es la influencia del espesor en los valores de la transmisividad. Es notable el hecho de que el cloruro sódico presente mayores valores de esta característica aun habiéndose ensayado en lentes de 4 mm, mientras que las de BaF₂ y CaF₂ eran de 3 mm. Puntualizar que a la hora de utilizar los datos correspondientes a los resultados estos dos ensayos para futuros análisis, se usará una media de ambos.

5 Recubrimiento con material polimérico.

Dado que el primer candidato para la fabricación de la ventana infrarroja es el cloruro sódico, es importante aplicarle un tratamiento superficial para protegerlo de la humedad del ambiente, pues presenta una elevada higroscopicidad, como ya se ha explicado.

5.1 Selección del material polimérico en base a sus propiedades ópticas.

Para que el recubrimiento sea eficaz, el material polimérico debe presentar propiedades ópticas adecuadas para que la ventana pueda desarrollar su función. Esto se comprobó mediante la medida de su transmisividad, como viene a ser habitual ya desde el anterior capítulo.

El procedimiento experimental correspondiente consistió en la preparación de láminas de polímeros a partir del estado en forma de granza. Para ello, se usaron prensas sobre placas calefactoras: se coloca la granza en pequeños moldes y se aplica presión mediante prensas para conformar la lámina, cuyo espesor se iba ajustando gracias al calor aportado por la placa. No obstante, una gran limitación lo fue el rango de temperaturas en el que podía trabajar la placa calefactora, ya que no podía alcanzar más de 200°C. A causa de esto, si un polímero poseía una Tg mayor de ese valor, no fundiría y no podría realizarse la lámina correctamente.

Tras la preparación de las muestras, se colocaron sobre un soporte fijo delante de una resistencia, y gracias a una cámara térmográfica, se pudo comprobar si eran o no visibles al infrarrojo. Los resultados de esta parte se muestran tabulados a continuación

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

Tabla 9. Resultados de los ensayos de transparencia al infrarrojo de diversas muestras preparadas de materiales poliméricos. Fuentes: (Hitachi High Tech Science Corporation, 1995), (Stratasys, 2007), (Charles E. Wilkes, 2005), (Reinaldo Brito e Dias, 2018), (Natália Navrátilová, 2014), (MatWeb, 2016) y (Ticona: "Engineering Polymers", 2007).

MATERIAL POLIMÉRICO	T _g (°C)	T _{FUSIÓN} (°C)	TRANSPARENCIA AL ESPECTRO INFRARROJO
PVC	~75,6	100 – 200	NO
ABS	104	221	NO
CERA DE PP	-25 a -15	~160	Sólo a bajos espesores
PS	95	203	NO
PVA	85	185	NO
RESINA EVA	-7 a 0	~150	NO
"EPOLENE WAX"	< 200	S/N	NO
PLA	~63,5	~157,5	NO
"VERSAFLEX CL-2242"	13 – 38	210 – 221	NO
"VECTRA A-950"	~293	S/N	Ensayo no realizado
"VECTRA B-950"	~293	S/N	Ensayo no realizado

A la vista de la Tabla 9 y de las termografías correspondientes (disponibles en el anexo de la memoria), se han desechado gran cantidad de polímeros debido a resultar opacos a la luz infrarroja. No obstante, se ha observado cómo la cera de polipropileno deja pasar la luz infrarroja por su parte de menor espesor, hecho que podría indicar que se trata de un problema de espesores. Se desarrollará esta idea más adelante.

Análogamente a los anteriores materiales poliméricos, también se han realizado termografías de láminas de policarbonato de distintas densidades y de polipropileno, resultando todas inadecuadas para el recubrimiento.

Adicionalmente, se realizaron ensayos sobre una lámina de Parafilm® (mezcla de parafinas) y sobre cinta adhesiva, resultando transparentes al infrarrojo. Este fenómeno refuerza la idea de focalizar el problema del espesor de la lámina.

Además, se trató de diluir grana de polipropileno y polietileno de baja densidad en tolueno, para ser aplicados posteriormente sobre el cloruro sódico. Tras permanecer la mezcla 20 días sin alterarse, se obtuvieron las siguientes imágenes:

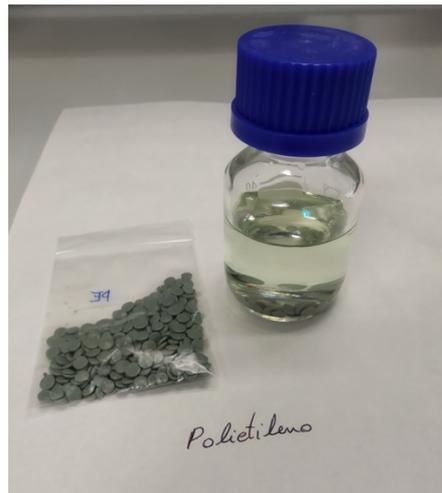


Ilustración 7. Resultado de la disolución de la granza de polietileno de baja densidad en tolueno tras 20 días.

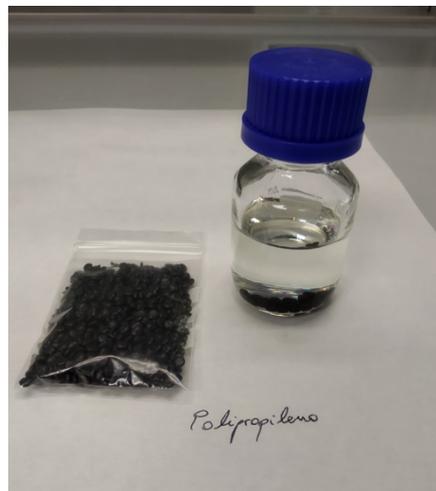


Ilustración 8. Resultado de la disolución de la granza de polipropileno en tolueno tras 20 días.

Como se puede observar en las dos anteriores ilustraciones, lejos de disolverse los polímeros, la granza ha permanecido inalterada en ambos casos. Tan sólo se puede apreciar que, para el caso del polietileno de baja densidad, se ha coloreado el disolvente ligeramente de amarillo, aunque esto es muy probable que se deba a algún aditivo presente en el polímero. Por lo tanto, esta opción también fue descartada.

5.2 Recubrimiento de la lente con Parafilm®.

Una vez comprobada la eficacia del aislamiento que proporciona la cobertura de Parafilm®, se procede a cuantificar en qué magnitud modifica las propiedades ópticas del cristal “virgen”. Para ello, se ha realizado un ensayo análogo al del apartado 4, donde se comprobaba la transmisividad de los cristales a distintas temperaturas. De nuevo, se presentan los resultados de la experiencia, con las termografías correspondientes en el anexo propio:

Tabla 10. Resultados de las medidas de transmisividades a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Parafilm, a T ambiente de 23,5 °C y HR del 4%.

NaCl + Parafilm	
<i>Tsin (°C)</i>	27,6
<i>Tcon (°C)</i>	27,3
τ	0,93
<i>Tsin (°C)</i>	38,4
<i>Tcon (°C)</i>	35,7
τ	0,81
<i>Tsin (°C)</i>	80
<i>Tcon (°C)</i>	68,8
τ	0,78
<i>Tsin (°C)</i>	96
<i>Tcon (°C)</i>	84,1
τ	0,779
<i>Tsin (°C)</i>	102,2
<i>Tcon (°C)</i>	89,1
τ	0,769
<i>Tsin (°C)</i>	119,8
<i>Tcon (°C)</i>	100,5
τ	0,745

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

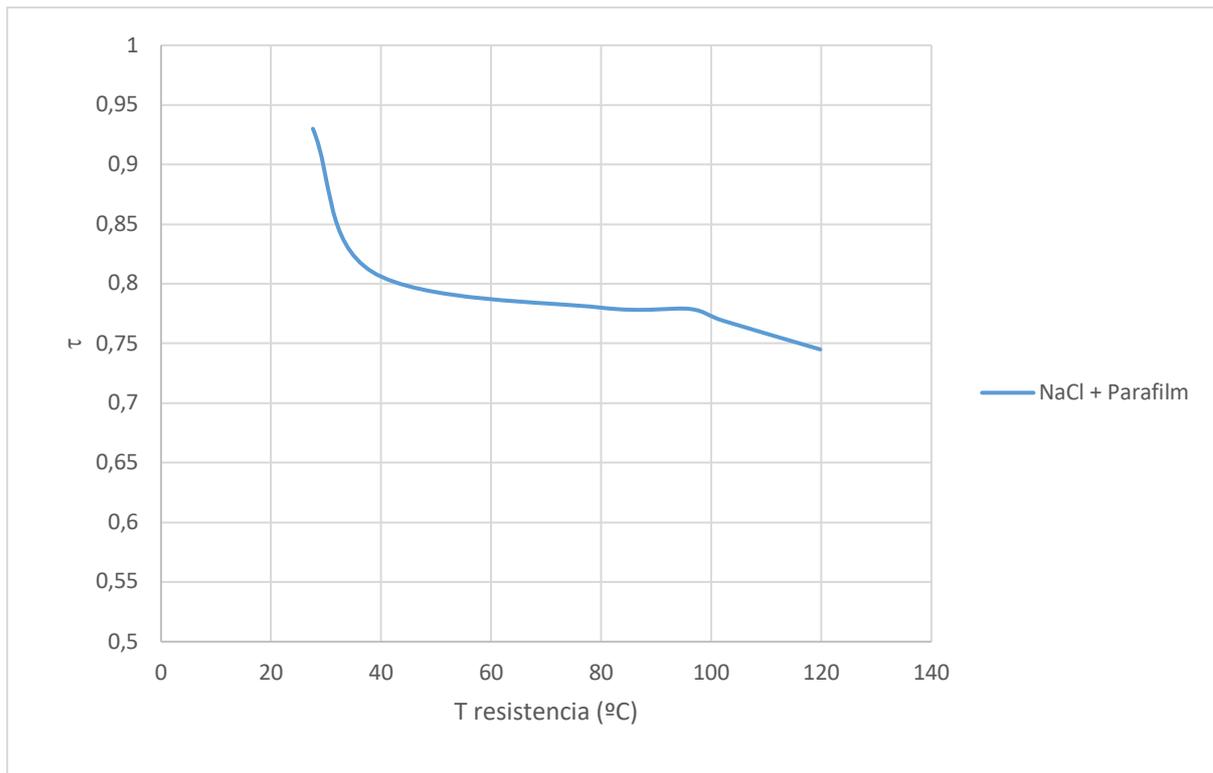


Figura 10. Resultados del ensayo de cálculo de la transmissividad a distintas temperaturas para el NaCl recubierto con Parafilm, a T ambiente de 23,5 °C y HR del 4%.

A la vista de los resultados, se cumple la premisa de que el recubrimiento provoca un ligero descenso en los valores de la transmissividad. Es imprescindible comentar que el mínimo espesor que se ha logrado alcanzar al recubrir, y el correspondiente al ensayo realizado, es de 0,22 mm (valor medido gracias a un micrómetro). Es importante recalcar que en realidad se trata de dos capas de 0,11 mm, pues la lente ha sido recubierta por ambas caras para protegerla de la humedad del ambiente.

Más adelante se discutirá la eficacia respecto a otras alternativas.

5.3 Recubrimiento de la lente con lámina de Polietileno de baja densidad.

De igual forma que el apartado anterior, se han comprobado las propiedades ópticas de la lente tras ser recubierta, esta vez, de una lámina de polietileno de baja densidad. Así, se ha medido las transmisividades a distintas temperaturas según se ha procedido anteriormente. A continuación, se muestran los resultados de la experiencia. De nuevo, las termografías correspondientes se encuentran en el anexo:

Tabla 11. Resultados de las medidas de transmisividades a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Polietileno, a T ambiente de 23,5 °C y HR del 3%.

NaCl + Polietileno	
<i>Tsin (°C)</i>	29,2
<i>Tcon (°C)</i>	28,9
τ	0,98
<i>Tsin (°C)</i>	37,1
<i>Tcon (°C)</i>	36,9
τ	0,96
<i>Tsin (°C)</i>	51,6
<i>Tcon (°C)</i>	47,4
τ	0,835
<i>Tsin (°C)</i>	67,1
<i>Tcon (°C)</i>	61
τ	0,823
<i>Tsin (°C)</i>	95,8
<i>Tcon (°C)</i>	85,4
τ	0,82
<i>Tsin (°C)</i>	108,5
<i>Tcon (°C)</i>	96,8
τ	0,805
<i>Tsin (°C)</i>	120,3
<i>Tcon (°C)</i>	106,8
τ	0,8

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

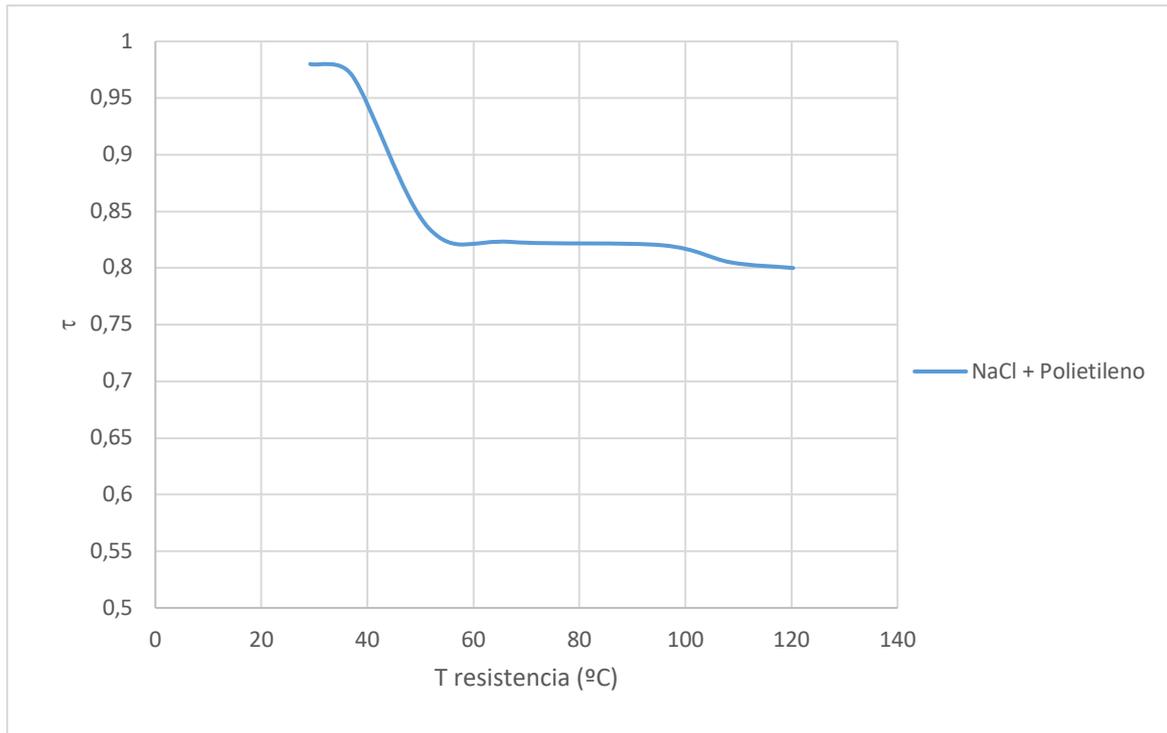


Figura 11. Resultados del ensayo para el cálculo de la transmissividad a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Polietileno, a T ambiente de 23,5 °C y HR del 3%.

Como ya se ha comprobado en anteriores ensayos, la transmissividad de la muestra disminuye con la temperatura, hasta estabilizarse alrededor de un valor intermedio.

El espesor del recubrimiento, medido con un micrómetro, ha resultado ser de 0,02 mm (de nuevo, se ha aplicado dos capas de 0,01 mm cada una). Se trata, sin duda, del recubrimiento más fino que se ha conseguido medir.

5.4 Recubrimiento de la lente con cinta adhesiva.

A parte de los anteriores recubrimientos, se ha decidido probar con cinta adhesiva debido a su bajo espesor y coste, además de resultar fácil de implantar sobre el cristal gracias al adhesivo.

Concretamente, se ha usado una cinta de celofan con mezcla de aceite y resina. La sustancia adhesiva, a su vez, se trata de un acrilato.

Siguiendo el procedimiento habitual, a continuación se muestran los resultados de transmisividades a sus correspondientes temperaturas. De nuevo, las termografías se adjuntan en el anexo de la memoria:

Tabla 12. Resultados de las medidas de transmisividades a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Cinta adhesiva, a T ambiente de 23,7 °C y HR del 4%.

NaCl + Cinta adhesiva	
<i>Tsin (°C)</i>	26,8
<i>Tcon (°C)</i>	24,9
τ	0,41
<i>Tsin (°C)</i>	39,7
<i>Tcon (°C)</i>	27,6
τ	0,24
<i>Tsin (°C)</i>	67,7
<i>Tcon (°C)</i>	33,8
τ	0,21
<i>Tsin (°C)</i>	96,3
<i>Tcon (°C)</i>	40,5
τ	0,18

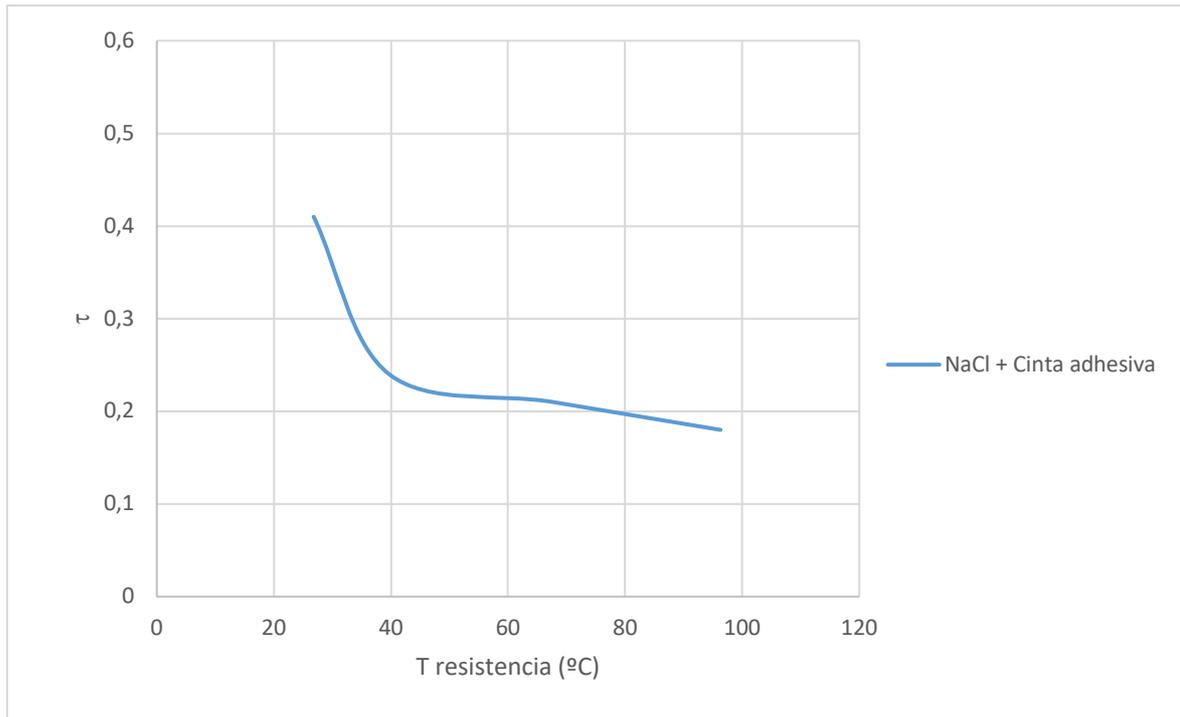


Figura 12. Resultados del ensayo para el cálculo de la transmisividad a distintas temperaturas para el cristal de NaCl recubierto con Cinta adhesiva, a T ambiente de 23,7 °C y HR del 4%.

A priori, observando los resultados de la experiencia, se descartaría el recubrimiento de cinta adhesiva debido a sus pobres propiedades ópticas: la transmisividad apenas supera valores de 0,4.

Además, se trata del recubrimiento más grueso: 0,12 mm de espesor por cada una de las dos capas. Esto acentúa aún más los bajos valores de transmisividad.

5.5 Evaluación de los distintos recubrimientos.

Una vez realizado el ensayo habitual sobre cada recubrimiento, es posible obtener una visión de conjunto centrándonos en el parámetro de la transmisividad gracias a la siguiente figura:

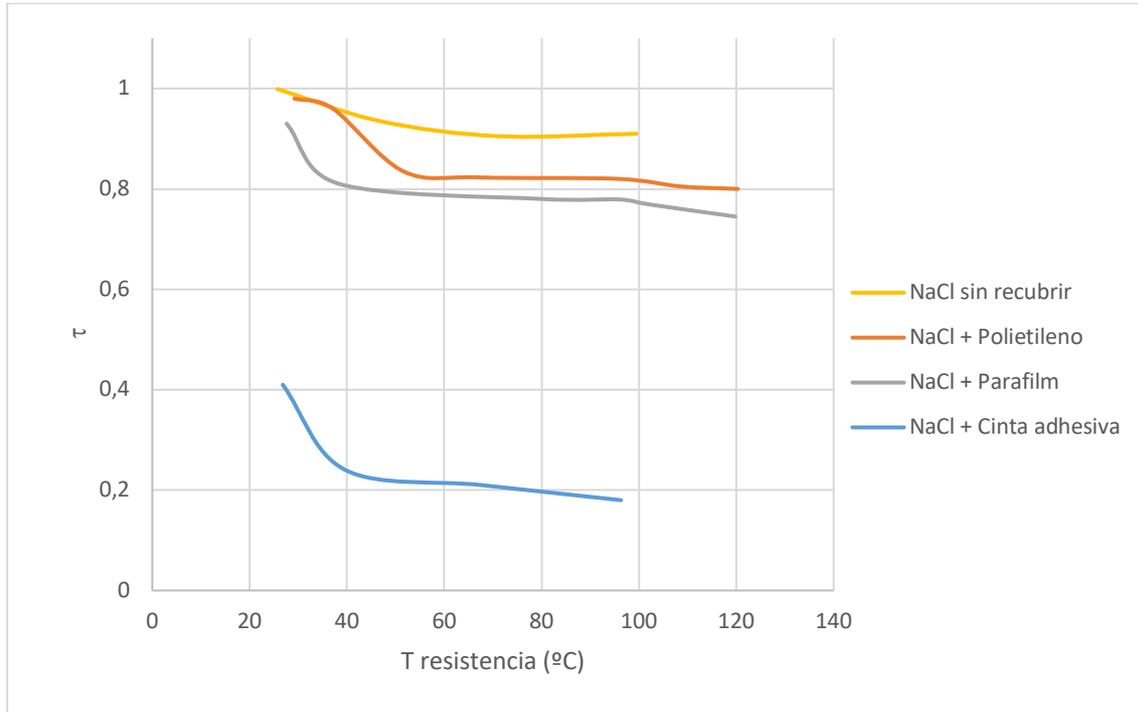


Figura 13. Transmisividad a distintas temperaturas de los distintos recubrimientos estudiados.

De acuerdo a la Figura 13, el material que ofrece una mayor transmisividad a la par de la protección contra el ambiente exterior, es el film de polietileno, seguido del Parafilm®. Como ya era de esperar, el recubrimiento de cinta adhesiva dista mucho de resultar efectiva para la aplicación estudiada.

Es imprescindible destacar que el ensayo se ha realizado sobre una capa de cada tipo de recubrimiento, es decir, el mínimo para lograr la protección contra el ambiente húmedo exterior. Los espesores de cada recubrimiento con los que se ha realizado el ensayo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13. Espesores de los distintos materiales usados para el recubrimiento del cristal.

MATERIAL DE RECUBRIMIENTO	ESPESOR (MM)
PARAFILM®	0,22
PE DE BAJA DENSIDAD	0,02
CINTA ADHESIVA	0,24

Aún poseyendo un espesor más de diez veces mayor al de la lámina de polietileno, el Parafilm® presenta propiedades ópticas satisfactorias a cualquier temperatura. Es por eso que será el material elegido para llevar a cabo el recubrimiento del cristal.

El Parafilm® es un material con excelentes propiedades ópticas, es capaz de estirarse para adaptarse a cualquier superficie y constituye un buen protector contra la humedad del ambiente (gran capacidad de aislamiento). Además, se trata de un material de muy bajo coste. Por todas estas ventajas, este será el material de recubrimiento que se estudiará con más detalle para, posteriormente, ser aplicado en la ventana infrarroja a nivel industrial.

Aunque es cierto que la lámina de polietileno de baja densidad presenta valores de transmisividad ligeramente más elevados, se va a estudiar el Parafilm®, ya que pese a que se sacrifican en muy baja medida las propiedades ópticas, se va a lograr un recubrimiento más seguro y consistente. Asimismo, existe la posibilidad de trabajar con cintas de Parafilm® más finas, cosa que aumentaría los valores de transmisividad de la muestra. En este trabajo, no se ha decidido reducir el espesor, para así facilitar la completa cobertura de la lente.

A priori, se intuye que a un mayor grosor en el recubrimiento, menor será la transmisividad que presentará el material (esta es la base por la que se escoge el Parafilm®). No obstante, debe cuantificarse en qué medida afecta la variable del espesor a los valores de transmitancia. Por ello, en el siguiente capítulo se va a estudiar la influencia del espesor tanto para el cristal del que está fabricado la ventana como para el material de recubrimiento.

5.6 Capacidad de protección de la humedad del recubrimiento.

Para cualificar el aislamiento que ofrece la lámina de material polimérico, se ha ensayado sobre secciones cortadas en laboratorio de sal en roca, usando una sierra eléctrica y una fresadora.

Durante el primer ensayo, se han recubierto un fragmento de cinta de PE (ver Ilustración 9) y otro de Parafilm® (ver Ilustración 10). Por último, se ha dejado un fragmento sin recubrir para comprobar la agresividad del medio (Ilustración 11).



Ilustración 9. Superficie inicial de roca de sal recubierta de lámina de PE.



Ilustración 10. Superficie inicial de roca de sal recubierta con Parafilm.



Ilustración 11. Superficie inicial de roca de sal sin recubrir.

En lo que concierne al ensayo, las muestras deben exponerse a una atmósfera con un alto porcentaje de humedad relativa. Para ello, se colocaron junto a dos vasos llenos de agua y un medidor de humedad relativa del ambiente dentro de un recipiente cerrado. El agua de los vasos pasará gradualmente al aire, y ello sumado a la humedad inherente del ambiente del laboratorio, se consiguieron rápidamente valores de humedad relativa del orden del 80% dentro del recipiente. La disposición se muestra en la siguiente ilustración:



Ilustración 12. Montaje del ensayo dentro del recipiente, para lograr un ambiente húmedo (alrededor del 80%).

Tras permanecer los cristales en estas condiciones durante dos semanas, fueron retiradas del recipiente y acto seguido se analizaron:

- Como cabía esperar, la superficie de sal sin recubrir se presentaba desgastada (disuelta) y húmeda, cosa que evidencia que se había conseguido una atmósfera agresiva dentro del recipiente.
- La superficie cubierta por la lámina de polietileno de baja densidad también se mostraba húmeda y desgastada. Por lo tanto, una sola capa de este polímero (que además resulta ser la más fina) no es suficiente para garantizar la protección del cristal que es recubierto.
- Por último, la superficie cubierta por Parafilm® se presentaba aparentemente inalterada, pulida tal y como se obtuvo tras trabajar con ella en la fresadora. No obstante, en determinados puntos podía apreciarse signos de humedad. Aunque no estaba tan mojada como en los anteriores dos casos, para garantizar la protección del cloruro sódico es necesario aumentar el número de capas del recubrimiento completo.

A la vista de los resultados y su discusión en el anterior capítulo, se consideró oportuno colocar una lente recubierta con 3 capas de Parafilm® en el mismo recipiente con las mismas condiciones de humedad.



Ilustración 13. Disposición de la lente de cloruro sódico en ambiente cerrado con una humedad relativa del 79%.

Tras una semana, se retiró la lente, descubriendo que el cristal bajo las 3 capas de Parafilm® se encontraba completamente seco e inalterado. Dado que este sistema de cobertura asegura la protección del cloruro sódico incluso exponiéndose a una atmósfera altamente agresiva, se utilizarán 3 capas de Parafilm® (0,66 mm) como espesor mínimo a la hora de diseñar una ventana infrarroja resistente a la humedad.

Estos resultados apoyan la decisión de escoger el Parafilm® para el diseño industrial: posee mayor capacidad de proteger al cristal comparándose con la lámina de polietileno, con la cual habría que aumentar en gran medida el espesor para conseguir un recubrimiento eficiente.

6 Influencia del espesor.

Una vez realizada el exhaustivo análisis de los distintos materiales con los que fabricar la ventana, así como de los respectivos recubrimientos en base a sus propiedades ópticas, es hora de basarse en otra variable crucial a la hora de diseñar la ventana infrarroja: su espesor óptimo.

En el capítulo 5.1, mientras se estudiaba cuáles de los materiales poliméricos debían escogerse, saltaba a la vista cómo sólo las láminas más finas resultaban visibles al infrarrojo, cosa que indicaba que se trata de un problema de espesores más que de propiedades ópticas. Por lo cual, tanto de esta experiencia como de la bibliografía, se intuye que espesores demasiado elevados conducen a la opacidad del material al infrarrojo. A continuación, se muestra un ejemplo extraído del recurso bibliográfico (Möllmann, 2010) para el cristal de BaF_2 :

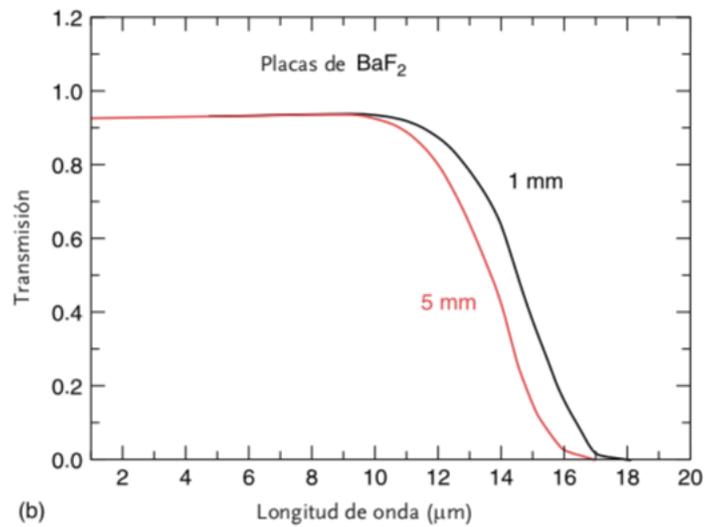


Figura 14. Espectros de transmisión en función del espesor para placas de 1 y 5 mm de BaF_2 .

Por lo tanto, este hecho plantea el siguiente problema: ¿Cuál es el espesor óptimo para fabricar la ventana? A continuación, se desarrollan varios ensayos para elaborar un modelo en base a la variable del espesor, tanto de la ventana como de su adecuado recubrimiento.

6.1 Influencia del espesor en el cristal de cloruro sódico.

De forma análoga a los ensayos realizados durante el capítulo 4, se calculan ahora las transmisividades de un cristal de cloruro sódico de 8 mm, es decir, del doble de espesor del estudiado anteriormente. La adquisición de cristales de cloruro sódico ha resultado una gran limitación, debido a su alto coste y complejidad de sintetización, por lo que la experiencia ha sido reducida a cristales de 4, 8, 12 y 16 mm, colocando 2, 3 y 4 cristales unidos.

Se muestran ahora los resultados para la experiencia a doble espesor, con las termografías correspondientes en el apartado de anexos:

Tabla 14. Resultados de las medidas de transmisividades a distintas temperaturas para el cristal de NaCl de 8 mm, a T ambiente de 23,7 °C y HR del 3%.

NaCl doble espesor	
T_{sin} (°C)	32,1
T_{con} (°C)	31,8
τ	0,96
T_{sin} (°C)	46,8
T_{con} (°C)	43,9
τ	0,865
T_{sin} (°C)	85,2
T_{con} (°C)	77,1
τ	0,85
T_{sin} (°C)	110,8
T_{con} (°C)	100,3
τ	0,84

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

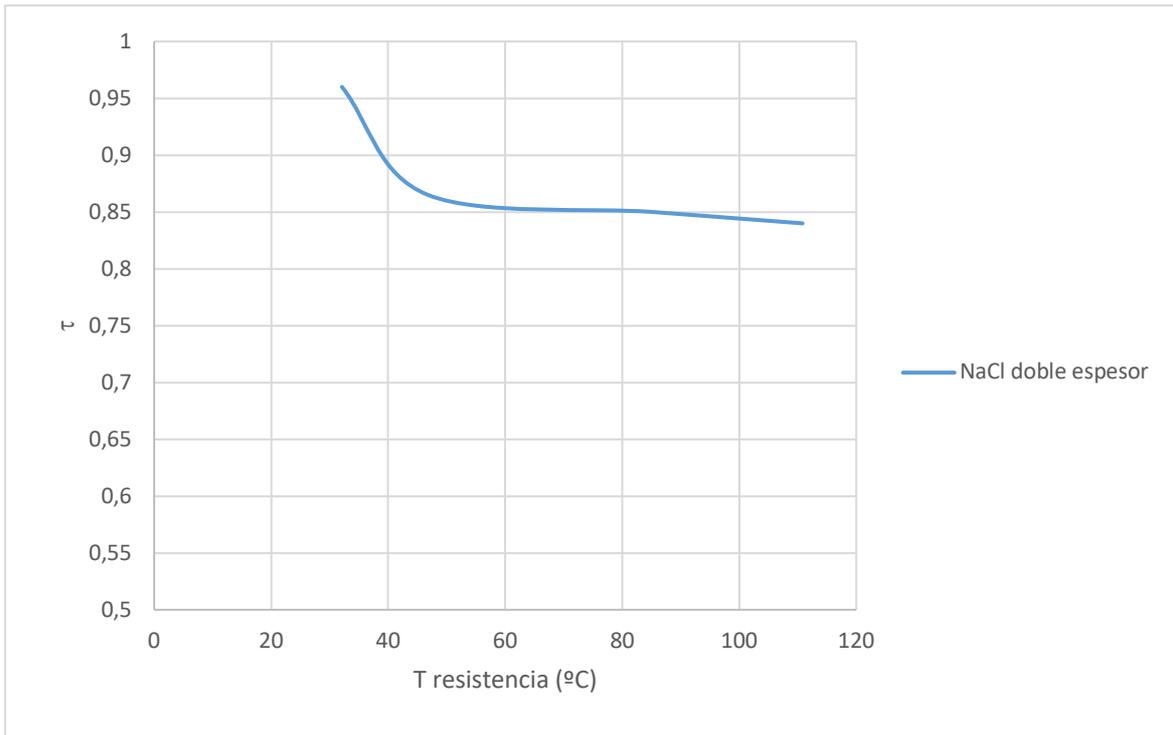


Figura 15. Resultados del ensayo para el cálculo de la transmisividad a distintas temperaturas para el cristal de NaCl de 8 mm, a T ambiente de 23,7 $^{\circ}\text{C}$ y HR del 3%.

Lo que nos lleva a la siguiente comparativa entre los dos cristales, representada en la siguiente figura:

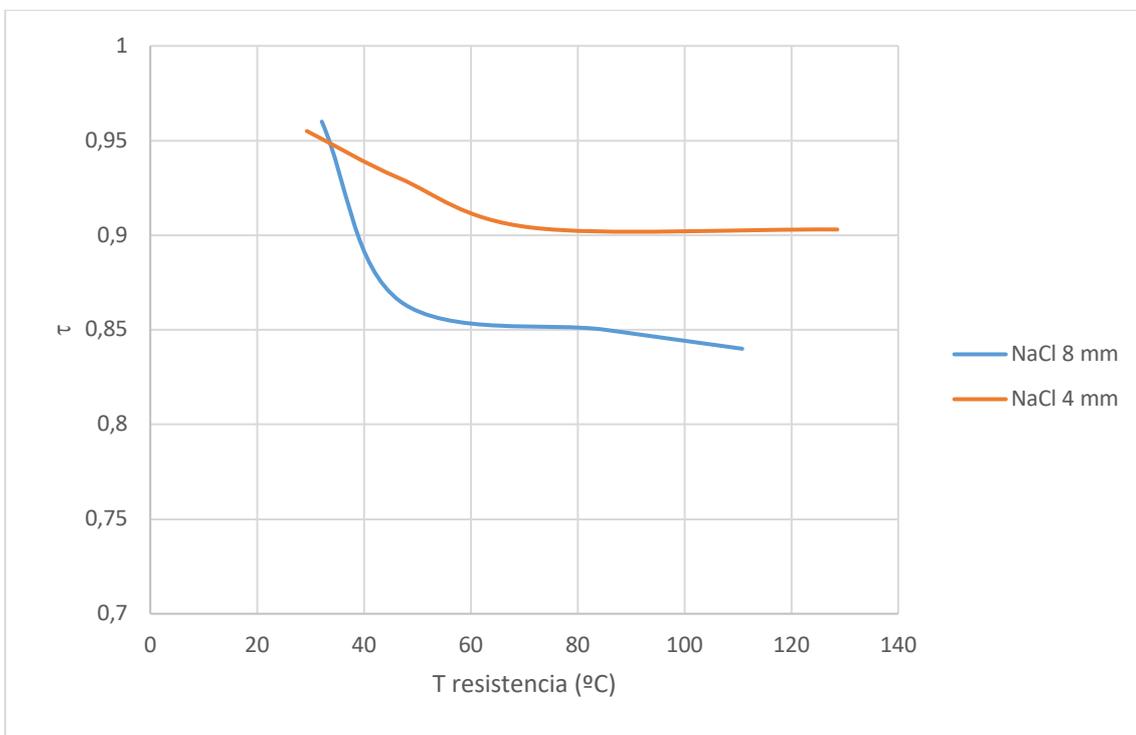


Figura 16. Comparativa entre transmisividades a distintas temperaturas para dos lentes de NaCl de distinto espesor.

Se puede observar de la anterior figura como, aun presentando un comportamiento análogo la transmisividad ante la temperatura, se estabiliza alrededor de valores dispares: mientras que la lente más fina de NaCl se estabiliza alrededor de 0,9, la más gruesa lo hace alrededor de 0,85. Esto supone un descenso en la transmisividad de 0,05 para 4 mm de diferencia en el grosor.

Dicho de otra forma:

$$\frac{0,9 - 0,85}{0,9} \cdot 100 = 5,56\%$$

Al doblar la cantidad del espesor (variación del 100%), la transmisividad tan sólo se ve reducida en un 5,56%, lo cual lleva a pensar en la baja sensibilidad dicha propiedad óptica respecto al cambio de espesor. No obstante, no debe pasarse por alto este parámetro para su aplicación real.

A continuación, se va a contabilizar este descenso en la transmisividad con diferentes espesores, fijando la temperatura de la fuente emisora a 70°C para simplificar el ensayo (alrededor de esta temperatura la variable de la transmitancia adquiere una tendencia constante con la temperatura). Además, se toma esta temperatura ya que coincide con las condiciones más restrictivas a las que se encontraría al instalarse en un panel eléctrico. Como bien se ha explicado anteriormente, la adquisición de lentes personalizadas es compleja debido a su coste y disponibilidad, por lo que se han realizado los ensayos colocando las lentes de 4 mm de espesor convenientemente unidas.

Así, se muestran los resultados tabulados de la experiencia, con las correspondientes termografías disponibles en el anexo:

Tabla 15. Transmisividad del cristal de NaCl de distintos espesores a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%..

ESPESOR (mm)	τ
4	0,96
8	0,85
12	0,71
16	0,59

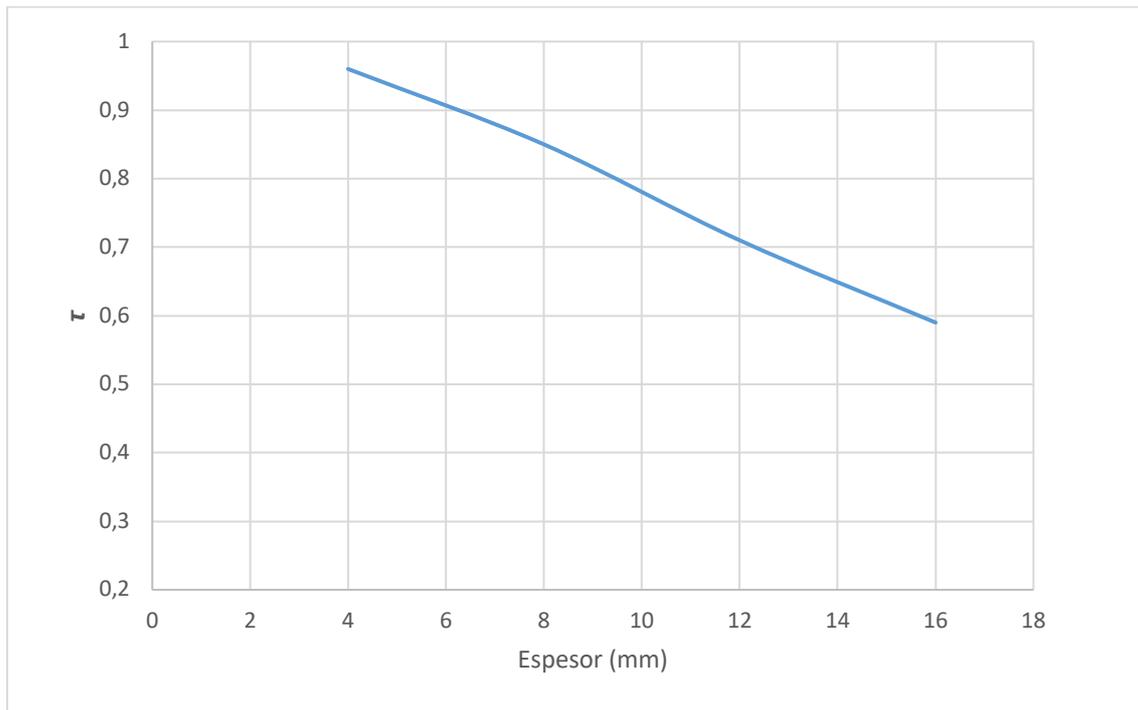


Figura 17. Gráfico de las medidas de transmisividad de cristales de NaCl de diferentes espesores, a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%.

Como puede observarse en la Figura 17, la caída de la transmisividad con el espesor es suave y homogénea. Según dicta el comportamiento teórico, los datos de este gráfico deberían seguir una tendencia exponencial negativa. Tras realizar el ajuste de los datos, tanto paramétrica como gráficamente, se obtiene la siguiente figura:

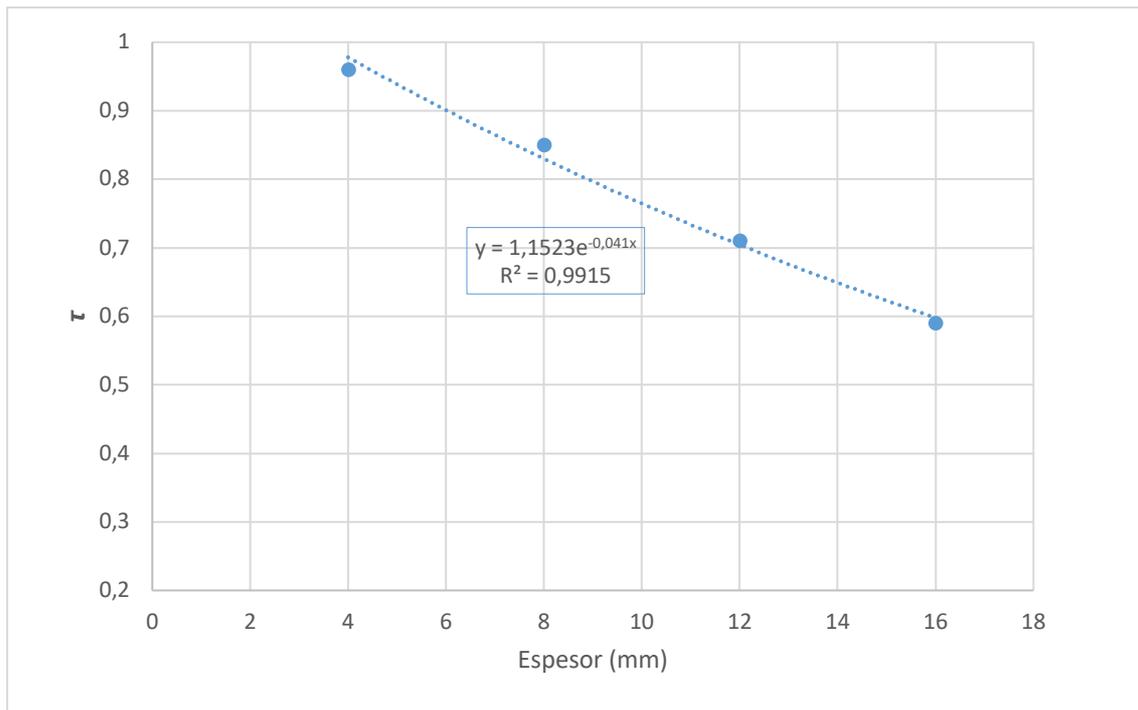


Figura 18. Transmisividad de cristales de NaCl de diferentes espesores, a temperatura constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%, con el respectivo ajuste exponencial, tanto gráfico como paramétrico.

A la vista del ajuste exponencial, pese a que no es perfecto, se puede llegar a la conclusión de que los datos siguen el comportamiento teórico. Por lo tanto, el ajuste que se muestra en la Figura 18 permite obtener un modelo que relacione la transmisividad con el espesor de la muestra, y su uso resultará crucial a la hora de diseñar los parámetros de la ventana infrarroja de forma óptima.

Una vez analizado el comportamiento de la transmisividad con el espesor del material de la ventana propiamente dicha (cloruro sódico), cabe realizar el mismo análisis sobre el material de recubrimiento escogido.

6.2 Influencia del espesor en el material de recubrimiento.

De igual forma que para el cloruro sódico, se ha realizado el ensayo habitual para hallar los valores de transmisividad del cristal (4 mm) junto a su recubrimiento, aplicando varias capas de Parafilm®. El ensayo se ha llevado a cabo manteniendo la fuente emisora de calor a 70 °C constantes, en las condiciones estancas de la caja. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 16. Medidas de transmisividad para una lente de cloruro sódico con recubrimiento de Parafilm de varios espesores, a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%.

ESPESOR (MM)	τ
0,22	0,802
0,44	0,55
0,66	0,465
0,88	0,373

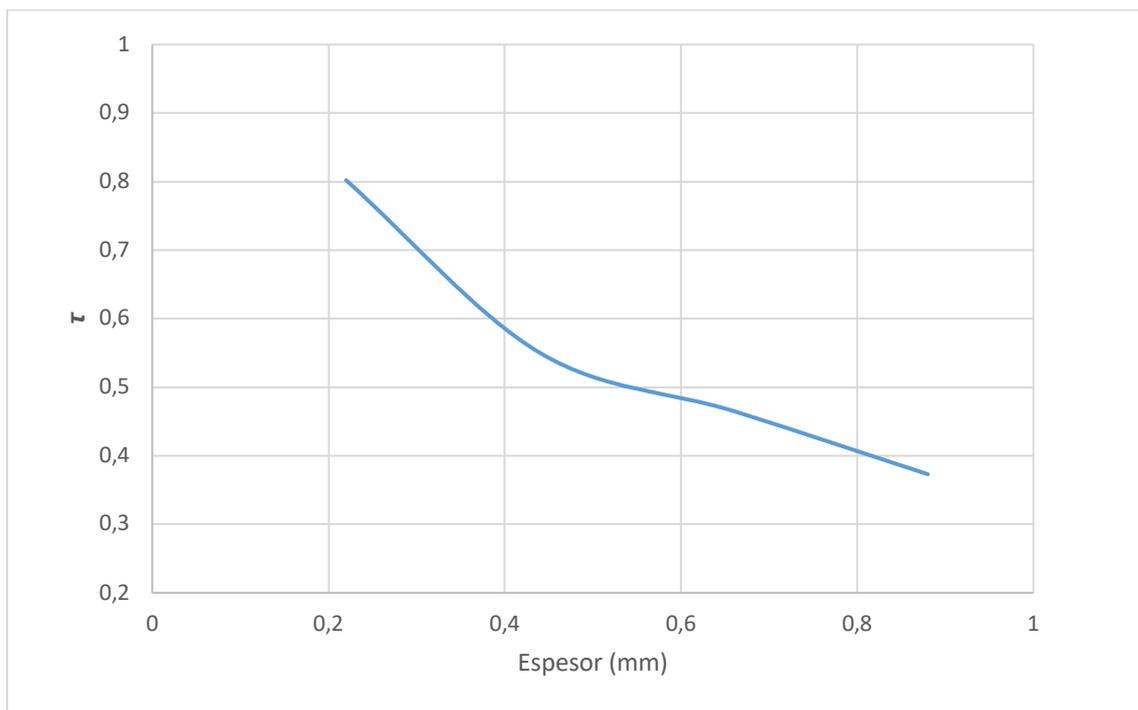


Figura 19. Gráfico de las medidas de transmisividad para una lente de cloruro sódico con recubrimiento de Parafilm de varios espesores, a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%.

En este caso, al aplicar el recubrimiento, al igual que para la experiencia para el cristal de cloruro sódico, la relación de la transmisividad con el espesor del Parafilm® adquiere una tendencia exponencial negativa. Por lo tanto, se realiza el pertinente ajuste según muestra la siguiente figura:

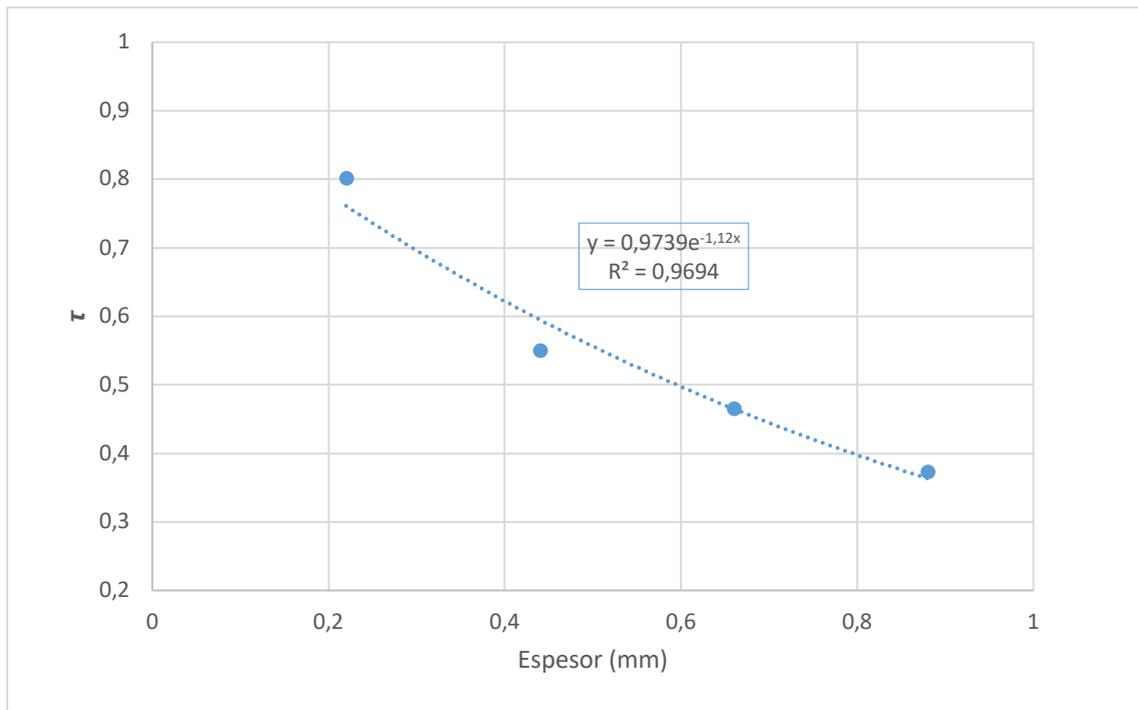


Figura 20. Gráfico de las medidas de transmisividad para una lente de cloruro sódico con recubrimiento de Parafilm de varios espesores, a temperatura de la fuente radiante constante igual a 35 °C y humedad relativa del 3%, con el respectivo ajuste exponencial, tanto gráficamente como paramétricamente.

Este tipo de ajuste es más común a la hora de estudiar el comportamiento de la transmisividad de los sistemas de materiales con el espesor de la muestra. Dado que se ha realizado sobre el sistema cristal más recubrimiento que se va a usar para desarrollar la ventana infrarroja, la ecuación exponencial que se presenta en la Figura 20 servirá de base para optimizar los parámetros del recubrimiento protector de la ventana infrarroja.

7 Aplicación a un diseño de una ventana infrarroja funcional.

Los ensayos pertinentes realizados, con los correspondientes resultados discutidos, permiten llevar a cabo el planteamiento, diseño y evaluación de una ventana infrarroja de elevadas prestaciones, competitiva en el mercado actual. Su aplicación va a estar destinada a la inspección de cuadros eléctricos de baja, media y alta tensión de forma segura, tal y como se ha definido en el alcance y objetivos de este documento.

7.1 Parámetros de diseño de la ventana infrarroja.

Sistema de aplicación.

De acuerdo con los distintos sistemas de aplicación expuestos en el capítulo 1.3, la ventana diseñada consistirá en un panel de visualización sellado. De esta forma, se instalará una lente de cristal, con su correspondiente recubrimiento dentro de una carcasa con tapa abatible, disponiendo así también de una junta que garantice la implantación hermética en el cuadro eléctrico.

Materiales de cada elemento del diseño.

Los distintos materiales que van a conformar de cada una de las partes de todo el diseño se resumen a continuación:

Tabla 17. Elementos que forman el diseño con sus correspondientes materiales de fabricación.

ELEMENTO	MATERIAL DE FABRICACIÓN
Lente	Cristal de cloruro sódico
Recubrimiento de la lente	Lámina de Parafilm®
Anillos roscados y tapa	Polipropileno (homopolímero)
Juntas	Caucho de silicona

Asimismo, se expone la justificación de la elección del material para cada elemento:

- El cloruro sódico va a conformar la lente de la ventana debido a sus excelentes propiedades ópticas y bajo coste, tal y como se discutió en el capítulo 4.
- Dado que la lente va a resultar en un material altamente higroscópico como lo es el cloruro de sodio, va a precisar un recubrimiento, el cual se define como una lámina de Parafilm®. La preferencia de este material polimérico frente a otros tipos se basa en las conclusiones obtenidas a partir de los resultados respectivos al capítulo 5. El Parafilm® es un polímero con muy buenas propiedades ópticas, barato y con la particularidad de estar diseñado para recubrir e impermeabilizar superficies concretas.

- La tapa y los anillos roscados, incluyendo la base donde se colocará el cristal termográfico, se fabricarán de polipropileno en su forma de homopolímero (posee, en general, mejores propiedades que su forma de copolímero etileno-propileno). Esta decisión se basa en varias propiedades de este polímero:

En primer lugar, destacan las propiedades mecánicas del polipropileno, mucho mejores que las de otros polímeros como el polietileno de alta densidad. Su gran dureza, resistencia a tracción y resiliencia hacen del polipropileno un excelente material estructural para la ventana (Nicholson, 2006).

Asimismo, este material polimérico presenta una gran estabilidad química, por lo que resistirá sin problemas cualquier condición adversa a la que sea expuesto. Además, sus propiedades térmicas permiten que pueda ser utilizado en cualquier condición de temperatura hasta los 160 °C, que coincide con su temperatura de transición vítrea (Stratasys, 2007).

Por último, el hecho de que se trate de un material barato y fácil de conformar resulta un factor determinante a la hora de escoger este polímero. Esta propiedad permite rebajar costes de la ventana. Tratándose de polipropileno, tanto la carcasa como la tapa incluso podrían imprimirse gracias al uso de la tecnología de la impresora 3D, hecho que facilita su distribución en el ámbito cotidiano. Se ha observado que otros modelos comerciales conforman la carcasa de aluminio anodizado para lograr mayor estabilidad en el sistema. Sin embargo, dado que el objetivo es obtener una ventana funcional más económica, se considera que la mejora de propiedades físicas no justifica el aumento de precio que conlleva.

Tabla 18. Precios de las diferentes opciones para los elementos estructurales de la ventana. Fuente: (Spanish Alibaba, 2019).

MATERIAL ESTRUCTURAL	PRECIO POR KG
Aluminio anodizado	De 10 a 55 \$/kg
Polietileno de alta densidad	De 3 a 5 \$/kg
Polipropileno	De 1,58 a 2 \$/kg

- Las juntas van a ser de silicona, material común para este tipo de aplicaciones: es barato y permite sellar herméticamente la ventana infrarroja a la pared del cuadro eléctrico.

Dimensiones del cristal infrarrojo.

De manera que pueda cumplir con su propósito, la lente debe presentar unas medidas correctas. Para asegurar el éxito de esta empresa, es necesario diseñar dos parámetros imprescindibles: diámetro y espesor de la lente.

En primer lugar, va a diseñarse el diámetro de la lente, pues a partir del mismo, vendrán definidas las dimensiones de la carcasa, el anillo de tuerca de cierre y de las juntas. Para diseñar correctamente esta dimensión, es necesario cuantificar su influencia sobre el campo visual o FOV (se indagó en este parámetro durante el capítulo 3).

A la vista de la Tabla 4, y teniendo en cuenta que un compartimento típico de paneles eléctricos mide 20 pulgadas de profundidad, será necesaria una ventana infrarroja de 3 pulgadas de diámetro. De esta forma, realizando una interpolación lineal entre los datos a 18 y 24 pulgadas del objetivo, es posible obtener el FOV que poseerá la cámara termográfica que sea utilizada para tomar las imágenes del panel a través de la ventana:

$$FOV_{horizontal} = 34,5 - \frac{34,5 - 28}{24 - 18} \cdot (24 - 20) = 30,16 \text{ in}$$

$$FOV_{vertical} = 27 - \frac{27 - 21,75}{24 - 18} \cdot (24 - 20) = 23,5 \text{ in}$$

Lo que significa que la cámara será capaz de tomar imágenes en un rango de hasta 30,16 pulgadas en horizontal y 23,5 pulgadas en vertical; o lo que es lo mismo, hasta 76,6 cm en horizontal y 59,7 cm en vertical. Este rango se adapta perfectamente a las medidas de un cuadro eléctrico típico. No obstante, en el caso de cuadros con varios equipos eléctricos que superen los límites de alcance de la cámara, será necesaria la implantación de varias ventanas infrarrojas de manera que se cubra todo el objetivo que vaya a monitorizarse.

Una vez diseñada la geometría del cristal, el valor de su espesor viene en función de su diámetro, basándose en el módulo de ruptura del cristal. Resulta lógico pensar que cuanto mayor sea el diámetro de la ventana, más frágil será. Por esta razón, todos los fabricantes de ventanas establecen un requisito de espesor para cada diámetro, cuya expresión matemática se muestra a continuación (Robinson, 2010):

$$Th = \sqrt{\frac{1,1 \cdot P \cdot \phi^2}{MR}} \quad (7)$$

Donde:

- T_h es el valor del espesor del cristal, en pulgadas.
- ϕ representa el diámetro de la lente, en pulgadas.
- P es la máxima diferencia de presión que soportará el cristal, en psi.
- MR es el módulo de ruptura del cristal, en psi.

Dado que el cristal va a estar fabricado principalmente de NaCl, su valor del módulo de ruptura es constante e igual a 560 psi. Este valor tan bajo indica la enorme fragilidad del cloruro sódico, hecho que conllevará a aumentar su espesor en mayor medida que para otras sales (Crystran Ltd., 2012).

En cuanto a la diferencia de presión que va soportar el cristal, es necesario prestar atención al hecho de que los paneles eléctricos típicos están diseñados para que a 25 psi, presión a la que se produce el arco eléctrico, se abran los conductos plenum y la corriente sea dirigida de forma opuesta a donde se encuentran los operarios (Robinson, 2010). Por lo tanto, 25 psi va a ser la presión mínima requerida para la ventana para que soporte el desvío arco eléctrico sin modificar su integridad, protegiendo en el acto al trabajador. También es posible calcular la diferencia de presión en función de la diferencia de potencial que se crea en el instante en el que se produce el arco eléctrico, haciendo uso de la ley de Paschen (Poisson & Tagliacuzzi, 2007):

$$V = \frac{a \cdot p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + b} \quad (8)$$

Donde:

- V es la tensión entre las superficies por donde se distribuye el arco, en voltios.
- P es la presión que experimentada.
- d es la distancia entre las superficies.
- a y b son constantes que dependen de la composición del gas.

Sin embargo, para simplificar el diseño, se hará uso del dato de 25 psi convencional.

Introduciendo estos parámetros a la ecuación (7), se obtiene el siguiente resultado:

$$T_h = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 25 \cdot 3^2}{560}} = 0,66 \text{ in} = 1,67 \text{ cm}$$

Por lo tanto, para que el cristal sea capaz de garantizar la seguridad necesaria tanto al material como al operario al producirse el arco eléctrico, tendrá un espesor de 1,67 cm. Este grosor es considerable, y pone en manifiesto la enorme fragilidad que presenta el cristal.

Geometría del recubrimiento.

Una vez se ha diseñado del espesor del cristal, el siguiente parámetro a diseñar será la disposición del recubrimiento. La forma en la que se va a lograr la cobertura de Parafilm® se basa en el ensayo realizado durante el capítulo 5.6, en el que se aplicaban 3 capas de 0,11 mm por todo el cristal, consiguiendo finalmente la protección contra la humedad en el ambiente.

En el caso de este diseño, se va a aplicar también tres capas de Parafilm® por cada cara del cristal. Mientras que la cara exterior tan sólo va a estar expuesta a la humedad del ambiente durante los procesos de inspección (se retira la tapa abatible), la interior quedará a merced de las condiciones de humedad impuestas por el aire que queda dentro del cuadro eléctrico (además, se expondrá a las condiciones exteriores durante los periodos en los que la tapa se encuentre abierta). Por lo tanto, para asegurar la integridad de la ventana y evitar tediosas tareas de mantenimiento, se va a aplicar el recubrimiento mencionado.

Para esclarecer el diseño de la ventana infrarroja, se muestra a continuación un despiece del mismo:

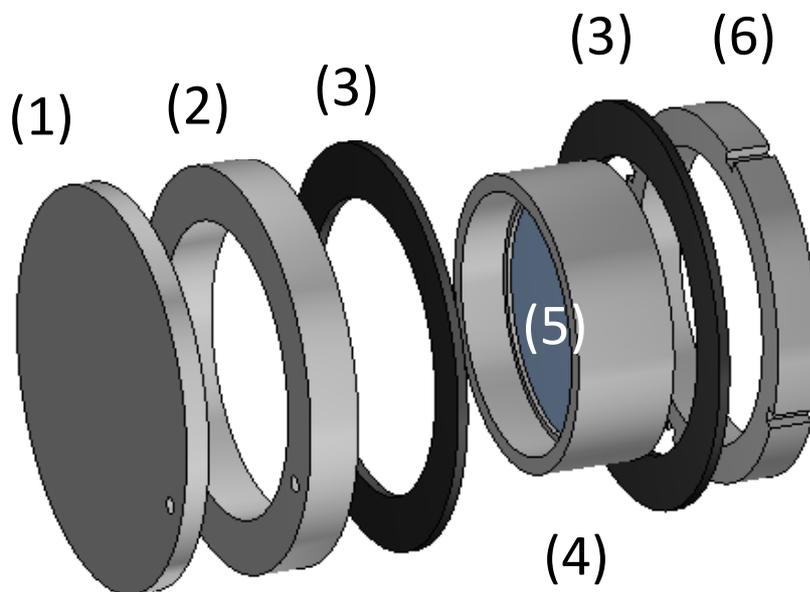


Figura 21. Despiece de la ventana infrarroja diseñada.

Tabla 19. Elementos identificados que conforman el diseño de la ventana infrarroja.

NÚMERO IDENTIFICADOR	NOMBRE DE LA PIEZA/ELEMENTO
(1)	Tapa abatible
(2)	Anillo roscado exterior
(3)	Juntas de silicona
(4)	Base roscada del cristal
(5)	Cristal termográfico
(6)	Anillo de tuerca de cierre

En el anexo de la memoria se puede encontrar los planos correspondientes a la ventana infrarroja completa, incluyendo los elementos de unión necesarios, así como de una vista de perfil seccionada para facilitar la comprensión del diseño.

7.2 Evaluación de las propiedades del diseño de la ventana infrarroja.

Una vez completado el diseño de la ventana infrarroja, así como de todos sus componentes, es necesario evaluar la calidad y certificar que efectivamente puede llegar a ser un modelo competitivo en el mercado actual de ventanas de elevadas prestaciones.

Para ello, se someten a juicio el parámetro principal que define la calidad de la ventana infrarroja: la transmisividad. De nada sirve un diseño sólido y seguro si no permite realizar las termografías a través del cristal, que es su objetivo al fin y al cabo.

Con el fin de evaluar de esta forma el diseño, se hace uso de dos métodos: experimental y teórico.

1. Para el método experimental, se colocaron 4 cristales de 4 mm (resultando en un espesor total de 1,6 cm) con tres capas de Parafilm® (0,66 mm), simulando la ventana diseñada de espesor 1,67 cm y tres capas de recubrimiento. Así, siguiendo el procedimiento típico durante todo el proyecto, consiguió medirse una transmisividad del sistema a 35,7 °C, tal y como resume la siguiente tabla:

Tabla 20. Transmisividad de la simulación de ventana infrarroja a 35,7 °C, con una temperatura reflejada igual a 25,4 °C y humedad relativa del 3%.

τ de la ventana infrarroja simulada	
T_{sin} (°C)	35,7
T_{con} (°C)	29,1
τ	0,345

Pueden encontrarse las termografías correspondientes a la obtención de este resultado en el anexo.

2. En cuanto al método teórico, es necesario basarse en los modelos planteados en el capítulo 6, en los que la transmisividad presentaba una caída exponencial conforme aumentaba el espesor de la muestra. Dado que el sistema está compuesto por un cristal de 1,67 cm de espesor y un recubrimiento de 0,66 mm, ambos materiales van a influir en el cálculo de la transmisividad del sistema completo. Por lo tanto, va a considerarse que cada sistema va a influir de manera proporcional en dicha propiedad, siendo:

$$\tau_{total} = \tau_{por\ cristal} \cdot \tau_{por\ el\ recubrimiento} \quad (9)$$

Ambas contribuciones, según los análisis mostrados en la Figura 17 y en la Figura 20 correspondientemente, son calculadas a continuación:

- Aportación de 1,27 cm de cristal termográfico:

$$\tau_{1,27\ cm\ cristal} = 1,1523 \cdot e^{-0,041 \cdot 12,7} = 0,68$$

- Contribución de los 0,4 cm restantes de cristal termográfico junto a 0,66 mm de recubrimiento:

$$\tau_{0,066\ cm\ cristal\ recubierto} = 0,9739 \cdot e^{-1,12 \cdot 0,66} = 0,465$$

Así, la transmisividad total es calculada según la ecuación (9):

$$\tau_{total} = 0,68 \cdot 0,465 = 0,316$$

La diferencia entre ambos métodos es sutil, y puede ser debida tanto por factores experimentales (aplicación irregular del recubrimiento, temperatura de la resistencia no estática, desenfoque de la lente de la cámara, redondeo realizado por el software de la cámara, etc.) tanto por ligeros desajustes a la ecuación exponencial (nótese que se logran R^2 desde 0,99 hasta 0,96 en la Figura 17 y en la Figura 20, respectivamente). Además, el sistema experimental que simula el comportamiento de la ventana posee 0,7 mm menos de espesor respecto al diseño, por lo que el valor experimental de transmisividad de 0,345 se vería ligeramente reducido.

La disparidad entre los dos resultados obtenidos puede cuantificarse mediante el cálculo del error relativo cometido:

$$\% \text{ error} = \frac{|0,316 - 0,345|}{0,316} \cdot 100 = 9,18\%$$

Pese a que puede parecer que la ventana infrarroja es incapaz de proporcionar imágenes fiables por medio de termografías a causa de estos bajos valores de transmisividad, nada más lejos de la realidad: ajustando correctamente los parámetros de emisividad de la cámara, podrán conseguirse imágenes nítidas y útiles para todos los trabajos de inspección de cuadros eléctricos. Asimismo, estos valores tan bajos de transmisividad son compensados con la alta resistencia mecánica y estabilidad del diseño, permitiendo llevar a cabo su función sin impedimentos.

7.3 Etiquetado.

Como paso final del diseño, debe definirse un sistema de etiquetado que sirva para identificar a la ventana y para determinar su correcta utilización. Esta información es crucial, y deberá mostrarse en la cara frontal de la tapa de cada ventana, de modo que el operario sea capaz de acceder a ella sin tener que retirar la tapa. La etiqueta deberá ser capaz de mostrar los siguientes datos:

- Codificación numérica que permita identificar a cada panel instalado. Esta información es especialmente importante para cuadros eléctricos donde se encuentran instaladas varias ventanas infrarrojas.
- Longitud de onda de trabajo de la ventana.
- Preferencias de emisividad a ajustar por el termógrafo, de forma que pueda obtener imágenes reales y de la mayor calidad posible.
- Datos de los objetivos que van a ser termografiados a través del panel: cables, conexiones, interruptores diferenciales...
- Fecha de instalación y seguimiento del mantenimiento de la ventana infrarroja.

Un ejemplo de una etiqueta que reúna todos estos datos se muestra a continuación:

Número de serie	UPV-IW nº X
Fecha de instalación	Dd/mm/aa
Fecha de último mantenimiento	Dd/mm/aa
Localización	Edificio X – Cuadro Y
Longitud de onda efectiva	LW, MW y SW
Preferencias de emisividad	$\varepsilon = 0,32$
Equipo eléctrico objetivo	Conexión a barra colectora 1

Figura 22. Ejemplo de etiqueta para el diseño de la ventana infrarroja.

7.4 Certificaciones y estándares.

Una vez evaluado el diseño, es importante detenerse ante los estándares actuales pertinentes a ventanas infrarrojas y a su campo de aplicación:

Actualmente, el único estándar que se relaciona completamente con ventanas infrarrojas es la clasificación UL (IRISS Inc, 2013). Dentro de la misma, la ventana diseñada cumpliría con el estándar UL508a, el cual cubre paneles de visualización industriales capaces de operar a voltajes de hasta 1000 voltios a temperaturas no superiores de 40 °C, siempre conforme con el “National Electrical Code” (ANSI/NFPA 70), que a su vez se trata de un estándar para el mantenimiento de equipo eléctrico (UL, 2018). Existen otros estándares para paneles de visualización de equipos eléctricos, como el IEEE C37.20.2, el cual especifica la carga que debe resistir el panel tanto en la cara interior como exterior. No obstante, este estándar presenta un gran inconveniente: al no estar dirigido a ventanas infrarrojas, difícilmente una ventana resistirá los ensayos pertinentes a este estándar. De hecho, la única lente infrarroja capaz de resistir el impacto de la carga al voltaje específico es la de zafiro (Robinson, 2010). Por lo tanto, este estándar se suele aplicar al mismo panel eléctrico, de forma que resista el arco eléctrico sin causar daños a otros elementos o personas. Este concepto ya fue introducido durante el capítulo 1.4.

Por último, en cuanto a protección de entradas, los estándares NEMA y IP son equivalentes. Éstos certifican carcasas para su uso interior y exterior: entrada de pequeños sólidos, ingreso de agua salpicada y ambiental, etc. Para el caso del diseño planteado, debería cumplir sin problemas con los estándares IP65/NEMA 4X.

7.5 Mantenimiento de la ventana infrarroja.

Es recomendable que durante las paradas de funcionamiento de los equipos eléctricos, se compruebe la integridad de los tornillos y juntas de todas las ventanas infrarrojas. Además, tratándose de cloruro sódico, en caso de necesitar ser limpiadas, debe hacerse con un disolvente apolar como lo es el ciclohexano. Asimismo, las paradas de funcionamiento constituyen una buena oportunidad para comprobar la transmitancia de la ventana infrarroja.

No obstante, si se han instalado y utilizado correctamente, las ventanas infrarrojas no deberían precisar de tareas de mantenimiento regulares, presentando largos periodos de vida útil.

7.6 Análisis económico del diseño.

En el caso de no usarse este diseño de ventana infrarroja, las inspecciones clásicas resultan ineficientes en tiempo y recursos económicos invertidos. A continuación, se muestra un presupuesto por capítulos aproximado correspondiente al desarrollo de una inspección tradicional, tomando los datos de precios unitarios de un banco de precios correspondientes a la Comunidad Valenciana actualizada a 2019 (IVE: Instituto Valenciano de Edificación, 2019). Asimismo, se ha tenido en cuenta la normativa NFPA 70E para la selección de equipo de protección personal (PPE) a la hora de realizar la inspección (NFPA: National Fire Protection Association, 2018):

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

Tabla 21. Presupuesto por capítulos correspondiente a la inspección tradicional de un equipo eléctrico.

CÓDIGO	RESUMEN	UNIDAD	CANTIDAD (u)	PRECIO UNITARIO (€/u)	IMPORTE (€)
01.	Preparación del equipo.				
01.01	Especialista electricidad	h	0,2	15,71	3,14
01.02	Oficial 1ª electricidad	h	0,2	18,49	3,7
01.03	Ingeniero técnico	h	0,2	29,42	5,88
01.04	Gafa protectora	ud	3	13,19	39,57
01.05	Casco aislante eléctrico 440V	ud	3	12,35	37,05
01.06	Guantes dieléctricos para alta tensión	ud	3	51,43	154,29
01.07	Bota dieléctrica	ud	6	19,98	119,88
01.08	Flash suit	ud	3	300	900
01.09	Costes indirectos	%	1261,748	3	37,85
02.	Desinstalación de la cubierta				
02.01	Especialista electricidad	h	0,3	15,71	4,71
02.02	Oficial 1ª electricidad	h	0,3	18,49	5,55
02.03	Ingeniero técnico	h	0,3	29,42	8,83
02.04	Costes indirectos	%	16,437	3	0,49
03.	Inspección con cámara infrarroja				
03.01	Especialista electricidad	h	0,05	15,71	0,79
03.02	Oficial 1ª electricidad	h	0,05	18,49	0,92
03.03	Ingeniero técnico	h	0,05	29,42	1,47
03.04	Costes indirectos	%	2,7395	3	0,08
04.	Reinstalación de la cubierta				
04.01	Especialista electricidad	h	0,5	15,71	7,85
04.02	Oficial 1ª electricidad	h	0,5	18,49	9,24
04.04	Costes indirectos	%	15,34	3	0,46
				TOTAL (€)	1341,97

Para finalizar, se realiza un resumen del presupuesto. El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) se calcula a partir del presupuesto total por capítulos (1341,97 €). A continuación, se suman los porcentajes correspondientes a los Gastos Generales (13%) y al Beneficio Industrial (6%), dando como resultado el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC). Por último, se obtiene el Presupuesto Base Licitación, que constituye el presupuesto total de la inspección, sumando el porcentaje del IVA (21%) al valor del PEC. Estos cálculos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 22. Resumen del presupuesto correspondiente a la inspección de equipo eléctrico por medio de termografías, de forma tradicional

DESCRIPCIÓN DEL IMPORTE	IMPORTE (€)
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	1341,97
+ BENEFICIO INDUSTRIAL (BI)	80,52
+ GASTOS GENERALES (GG)	174,46
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)	1596,94
+ IMPUESTO SOBRE EL VALOR AÑADIDO (IVA)	335,36
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	1932,30

El presupuesto base de licitación, es decir, el presupuesto total correspondiente a la inspección de un cuadro eléctrico sin el uso de ventana infrarroja, asciende a mil novecientos treinta y dos euros con treinta céntimos.

Es posible observar que los costes de inspección de un cuadro eléctrico son muy elevados, aun sustrayendo los costes derivados de los equipos de protección personal, todo sin mencionar la gran cantidad de tiempo invertido en cada trabajo. Por lo tanto, tal y como mostrará de forma clara el apartado de presupuesto de este proyecto, la instalación de una ventana infrarroja resulta, más allá de una buena decisión desde el punto de vista económico, crucial desde el punto de vista de seguridad y ahorro de tiempos.

La ventana, junto a sus elementos (cuyo precio se definen al alza) costaría 119,03 euros, mientras que su instalación sería una inversión de pago único de 982,07 euros: a partir de ahí, cada inspección sería sumamente barata, pues tan solo requeriría de un técnico termógrafo con PPE mucho menos severas que las necesarias al abrir el cuadro eléctrico. Nótese que la inspección de un único cuadro eléctrico sin ventana supera con creces el coste de cualquier modelo comercial, el cual puede utilizarse para infinito número de inspecciones durante su periodo de vida útil sin ningún coste adicional (salvo algún posible mantenimiento puntual).

Por último, desde el punto de vista del mercado de ventanas infrarrojas, el costo del prototipo diseñado (precios al por mayor) resulta muy bajo teniendo en cuenta sus elevadas prestaciones, pudiendo convertirse en un modelo competitivo con las demás casas comerciales.

8 Conclusiones generales del proyecto.

A lo largo de este documento, se han realizado gran cantidad de ensayos de transmisividad sobre diversos materiales, con la finalidad de encontrar la mejor alternativa para realizar un diseño totalmente funcional de una ventana infrarroja. Para ello, se ha seleccionado el cloruro sódico como material de fabricación de la lente en base a sus propiedades ópticas excepcionales. A causa de su higroscopicidad inherente, debía ser recubierto con algún material polimérico, por lo que tras ensayar con gran cantidad de candidatos, se seleccionó el Parafilm® tanto por sus aceptables propiedades ópticas como por el eficiente aislamiento que prestaba al cristal. La fiabilidad de esta protección contra la humedad también fue sometida a ensayo, tras lo cual se corroboró la eficacia del Parafilm® a la hora de realizar su función. Por último, con la finalidad de ofrecer solidez al diseño de la ventana infrarroja, se realizaron ensayos de transmisividad con los materiales escogidos para diversos espesores, obteniendo curvas teóricas para el comportamiento esta propiedad óptica para distintos grosores de cloruro sódico y Parafilm®.

Una vez finalizado este último ensayo, se dio comienzo a la fase de diseño de la ventana. Gracias a la base teórica y a las experiencias recreadas en laboratorio, todos los parámetros de la nueva ventana infrarroja podían ser definidos asegurando la integridad y las elevadas prestaciones de la ventana.

Así, con este seguimiento cuya información se detalla en anteriores capítulos de este documento, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- El cloruro sódico es el material idóneo para lograr los objetivos del proyecto: presenta excepcionales propiedades ópticas tanto en el rango del visible como en el del infrarrojo, a un precio muy reducido. Sus dos principales inconvenientes, su alta higroscopicidad y fragilidad, se compensan aplicando un recubrimiento y aumentando su espesor en la ventana, respectivamente.
- De igual forma que para el material de la lente, el Parafilm® es un material polimérico sumamente barato y con excelentes propiedades ópticas en una banda ancha que incluye desde el UV hasta el infrarrojo. Además, según los ensayos llevados a cabo durante el capítulo 5.6, resulta un adecuado medio de protección contra la humedad del ambiente, ofreciendo un recubrimiento sólido y eficaz.
- Los parámetros del diseño de la ventana infrarroja, a partir de los ensayos previos y basándose en la transmisividad de las muestras y en sus propiedades mecánicas, así como en las medidas de un cuadro eléctrico estándar, resultaron en un cristal de 3 pulgadas de diámetro, con 1,67 cm de grosor recubierto con 0,66 mm de Parafilm® por ambas caras. Gracias a estos factores, la ventana puede llevar a cabo su función sin inconvenientes, por lo que se considera que los parámetros han sido adecuadamente escogidos. No obstante, es necesario informar al termógrafo de disminuir el parámetro de emisividad de su cámara, para compensar la baja transmisividad del sistema a temperatura ambiente (alrededor del 0,32).

A parte del cristal y su recubrimiento, el diseño engloba todos los elementos que logran la correcta instalación y disposición de la ventana en la pantalla del cuadro eléctrico: juntas de unión, tapa protectora abatible, anillos y bases roscadas. Todos los materiales

de fabricación para cada elemento están completamente definidos, de forma que el conjunto conforme una ventana infrarroja segura y eficaz.

Además de resultar fiable y de gran calidad, el diseño asegura un coste económico reducido frente tanto a otros modelos comerciales (tan solo 119,03 euros), tanto a alternativas de inspección tradicionales. Se considera que este hecho compensa los bajos valores de transmisividad del sistema. Por lo tanto, es posible afirmar que, efectivamente, el prototipo diseñado llegaría a ser un modelo competitivo en el mercado actual de ventanas infrarrojas a media y larga onda.

Finalmente, tras observar el alcance del proyecto definido al inicio del mismo, se concluye que los objetivos definidos han sido cumplidos satisfactoriamente, obteniendo al final un diseño de una ventana infrarroja de elevadas prestaciones de coste reducido. Aunque se logre a costa de unos bajos valores de transmisividad, este hecho urge de futuros trabajos, de manera que rediseñando el recubrimiento y reforzando la estructura de cristal de manera que se consiga aumentar su resistencia mecánica, se optimice el diseño. No obstante, estos hitos exceden los límites del alcance del proyecto. Aún así, a partir de estudios exhaustivos más allá del mismo, podría mejorarse el diseño, de forma que la ventana presente un menor espesor, más transmisividad, mayor rango de trabajo y una estructura más resistente y fácil de instalar; todo con la reducción en costes que estas mejoras conllevan.

9 Avances futuros.

Aún habiendo cumplido los objetivos del proyecto satisfactoriamente, podrían ampliarse para lograr un diseño de mejor calidad a un precio reducido. No obstante, y aunque sobrepasen el alcance de este documento, existen varios campos en los que avanzar:

- Reforzar el cloruro sódico, de manera que sea posible reducir el espesor de la lente sin arriesgar su rotura frágil. Esto conlleva enormes ahorros económicos y mejora sus propiedades ópticas.
- Estudio de un recubrimiento polimérico más fiable: mayor transmisividad a espesores más finos y mayor capacidad de aislamiento.
- Optimización de los elementos que conforman la ventana, asegurando una mejor integridad con el panel al que se instala a un precio reducido.

10 Bibliografía.

- Álava Ingenieros. (2019). *Álava Ingenieros: grupo Álava*. Recuperado el 6 de Julio de 2019, de <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/imagen-y-fotonica/termografia-y-camaras-termograficas/ventanas-de-infrarrojos--ir-windows/>
- American Society For Testing And Materials. (2002). *Standard test method for measuring and compensating for transmittance of an attenuating medium using infrared imaging radiometers*. West Conshohocken, Pensilvania, EEUU.
- Charles E. Wilkes, C. A. (2005). *PVC Handbook*.
- Chen, S. (2018). *spanish.alibaba*. Recuperado el 5 de Julio de 2019, de <https://spanish.alibaba.com>
- CorDEX Instruments. (2018). *farnell*. Recuperado el 6 de Julio de 2019, de <https://es.farnell.com/c/prueba-medida/medidores-de-temperatura-camaras-termograficas/ventanas-infrarrojas-ir?brand=cortex>
- Crystran Ltd. (2012). *Crystran.co.uk*. Recuperado el 10 de Julio de 2019, de <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/sodium-chloride-nacl>
- DeMonte, J. (2012). *Transmission Stability and Infrared Windows*.
- FLIR. (2019). *flir*. Recuperado el 6 de Julio de 2019, de <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/imagen-y-fotonica/termografia-y-camaras-termograficas/ventanas-de-infrarrojos--ir-windows/ventanas-de-infrarrojos--ir-windows---flir-systems/documentos/>
- Fluke Corporation. (2018). *Fluitronic*. Recuperado el 6 de Julio de 2019, de <https://www.fluitronic.es/ventana-ir-de-50-mm-3460346>
- Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid. (2011). *Guía de la Termografía Infrarroja: Aplicaciones en ahorro y Eficiencia energética*. Madrid, Comunidad de Madrid, España.
- Greenspan, L. (1976). *Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions*. Washington, D. C.
- Hitachi High Tech Science Corporation. (1995). *Thermal Analysis of Polyvinyl Chloride*. Tokyo.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2001). *insst*. Recuperado el 3 de Julio de 2019, de https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2001/614_01/PDFs/realdecreto6142001de8dejuniosobredisposicionesminimasp.pdf
- IRISS Inc. (2013). *dselectricaltechnologies*. Recuperado el 13 de Julio de 2019, de <http://dselectricaltechnologies.com/Safer.pdf>
- IRISS Inc. (2016). *cf-cdn.iriss*. Recuperado el 10 de Julio de 2019, de https://cf-cdn.iriss.com/wp-content/uploads/2016/10/VP_Installation_Instructions.pdf

- IRISS Inc. (2019). Recuperado el 6 de Julio de 2019, de <https://www.iriss.com/emsd-cast-products/vp-series/vpt-series/>
- IVE: Instituto Valenciano de Edificación. (Junio de 2019). *five*. Recuperado el 19 de Julio de 2019, de <https://www.five.es/productos/herramientas-on-line/visualizador-2019/>
- Knight Optical. (2019). *Knight Optical Ltd*. Recuperado el 5 de Julio de 2019, de <https://www.knightoptical.com/stock/optical-components/infrared-optics/barium-fluoride-optical-components/>
- Möllmann, M. V.-P. (2010). *Infrared Thermal Imaging : fundamentals, research and applications*. (R. R. Pastor, Trad.) Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- MatWeb. (2016). *MatWeb*. (MatWeb) Recuperado el 31 de Mayo de 2019, de <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=f5469878864b4fa09d59251ca6802401&ckck=1>
- Natália Navrátilová, P. D. (2014). *ResearchGate*. Recuperado el 31 de Mayo de 2019, de https://www.researchgate.net/figure/DSC-TG-record-of-PLA-6-5-mg-measured-in-argon_fig2_270808850
- NFPA: National Fire Protection Association. (2018). *NFPA 70E: A Estandar for Electrical Safety in the Workplace*. (NFPA, Ed.) Quincy, EEUU.
- Nicholson, J. W. (2006). *The Chemistry of Polymers*. (3ª edición ed.). RSC Publishing.
- Poisson, M., & Tagliacuzzi, E. (2007). *FísicaRecreativa*. Recuperado el 28 de Julio de 2019, de https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mod/descarga_Glow_aire_2k7.pdf
- Reinaldo Brito e Dias, N. P. (2018). Systematic Study of Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) in the Manufacturing of Protector Devices for the Orofacial System. En *Biomaterials in Regenerative Medicine*.
- Robinson, M. (2010). *10 Cosas Que Debes Saber Sobre Ventanas Infrarrojas*. EEUU: IRISS Inc.
- Rodacciai SL. (2009). *Rodacciai*. Recuperado el 8 de Julio de 2019, de <http://www.rodacciai.es/normeetabelle.php?pid=37>
- sgcg. (29 de Agosto de 2004). Recuperado el 22 de Junio de 2019, de <http://sgcg.es/articulos/2014/08/29/transferecia-de-calor-por-radiacion-5-emisividad-absorbidividad-y-reflectividad/>
- SolidWorks Web Help. (2016). *SolidWorks Web Help*. Recuperado el 22 de Mayo de 2019, de http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Radiation_Topics/IDH_Analysis_Background_Radiation.html?format=P&value=
- SOREM SAS. (2003). *h-vir*. Recuperado el 6 de Julio de 2019, de <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/imagen-y-fotonica/termografia-y-cameras-termograficas/ventanas-de-infrarrojos--ir-windows/ventanas-de-infrarrojos--ir-windows---h-vir-/documentos/>

Spanish Alibaba. (Julio de 2019). *Spanish Alibaba*. Recuperado el 8 de Julio de 2019, de <https://spanish.alibaba.com/g/low-density-polyethylene-prices.html>

Stratasys. (2007). Recuperado el 31 de Mayo de 2019, de <https://web.archive.org/web/20120227150812/https://www.nrri.umn.edu/NLTC/ABS07.pdf>

Ticona: "Engineering Polymers". (2007). Recuperado el 31 de Mayo de 2019, de <http://www.hipolymers.com.ar/pdfs/vectra/datos/vectra%20A950.pdf>

UL. (2018). *StandardsCatalog*. Recuperado el 13 de Julio de 2019, de https://standardscatalog.ul.com/standards/en/standard_508a_3

Vecchio, A. &. (2003). *Thermographic Investigations of Temperatures and Heat Fluxes in Hypersonic Large-Scale Plasma Flow*.

ANEXO DE TERMOGRAFÍAS

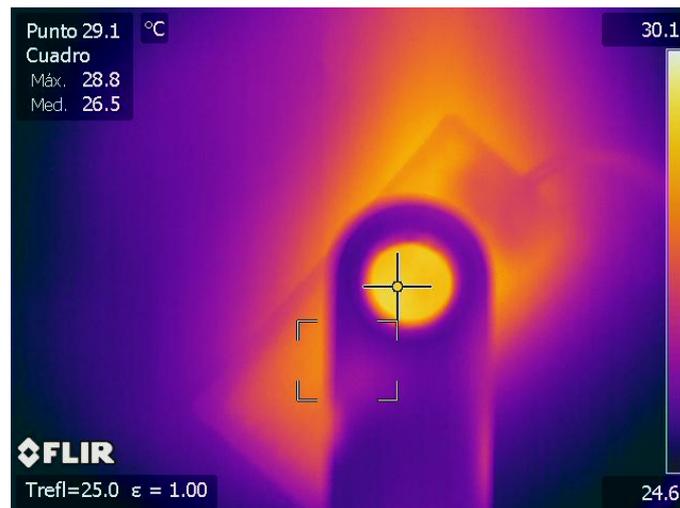
1. MEDIDAS DE TRANSMISIVIDADES DE DISTINTAS SALES.

ENSAYO NÚMERO 1

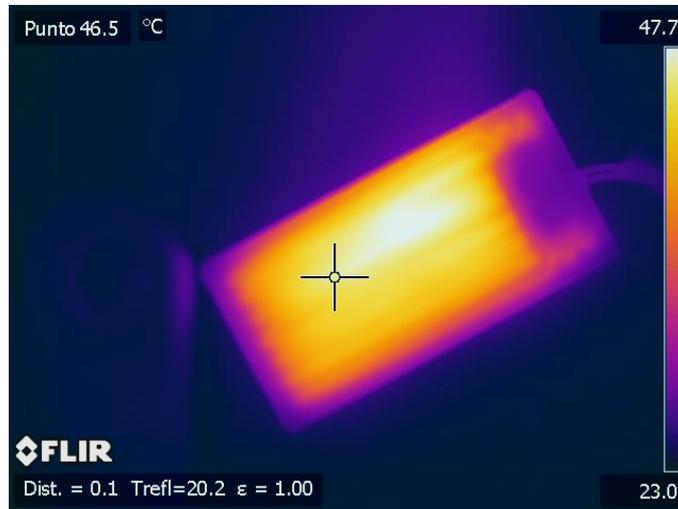
NaCl



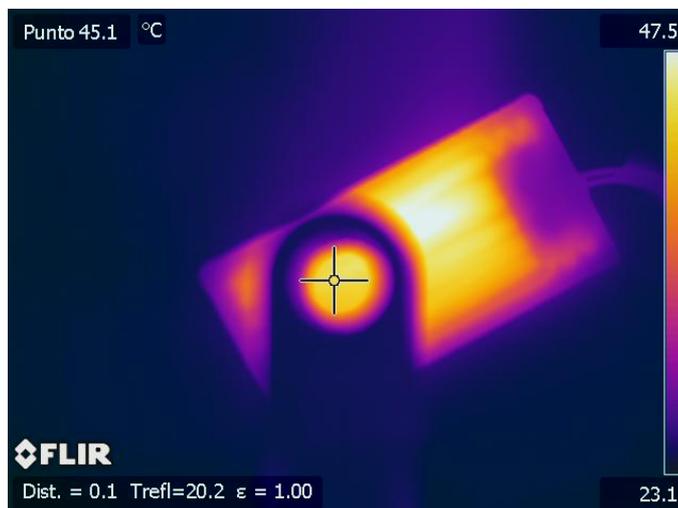
Termografía 1. Medida de la temperatura de la resistencia a 29,1 °C..



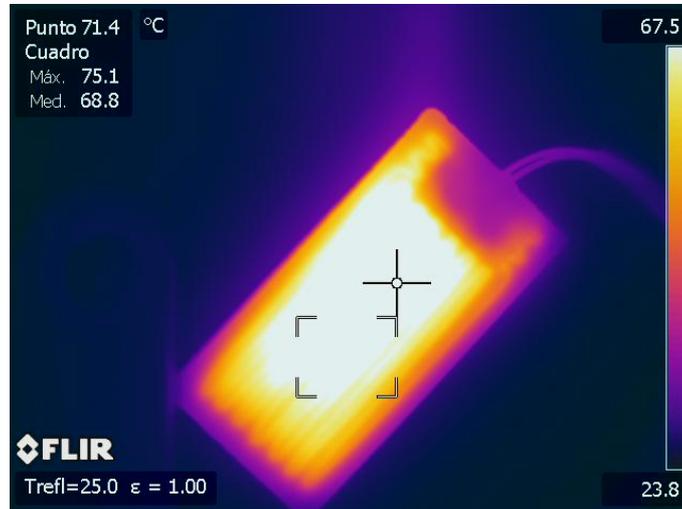
Termografía 2. Medida de la transmisividad del NaCl a 29,1 °C.



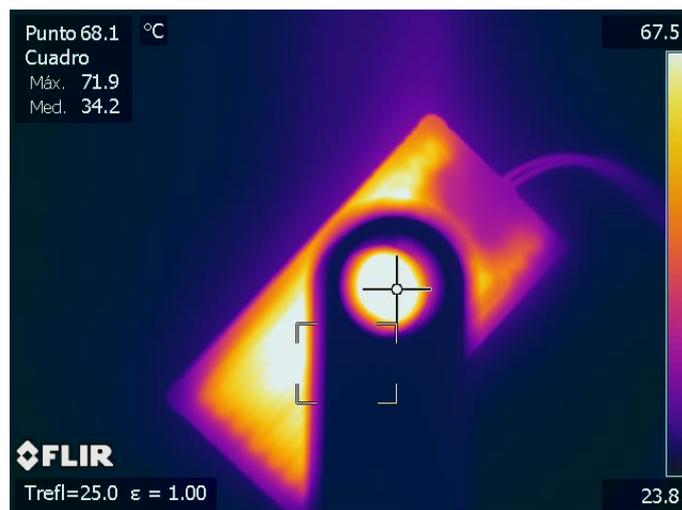
Termografía 3. Medida de la temperatura de la resistencia a 46,5 °C.



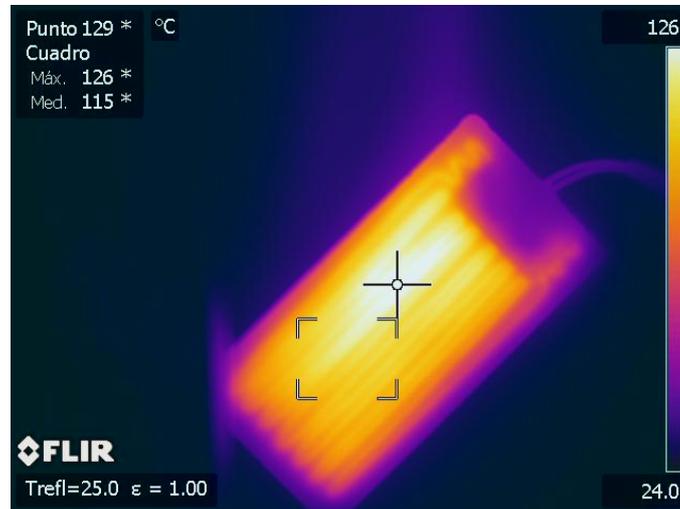
Termografía 4. Medida de la transmisividad del NaCl a 46,5 °C.



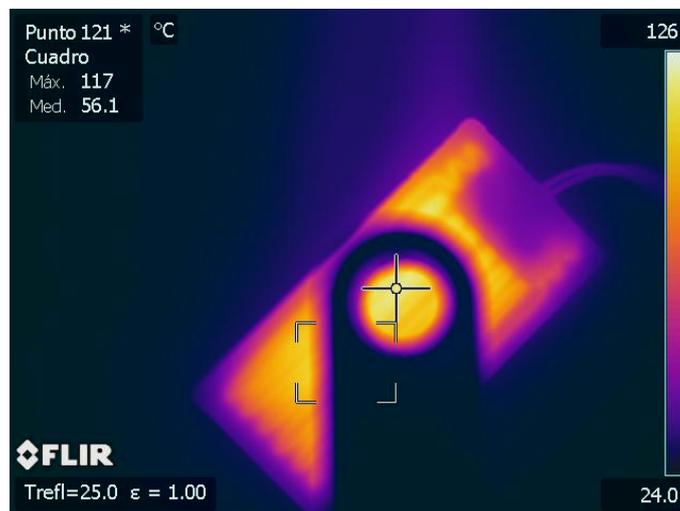
Termografía 5. Medida de la temperatura de la resistencia a 71,4 °C.



Termografía 6. Medida de la transmisividad del NaCl a 71,4 °C.



Termografía 7. Medida de la temperatura de la resistencia a 129 °C.

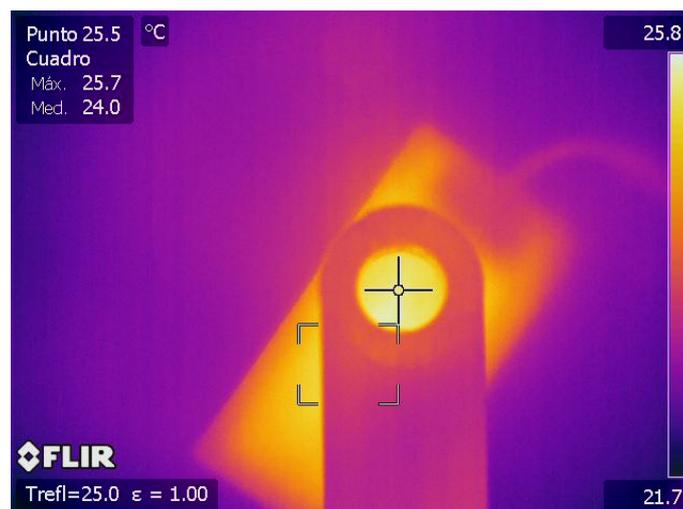


Termografía 8. Medida de la transmisividad del NaCl a 129°C.

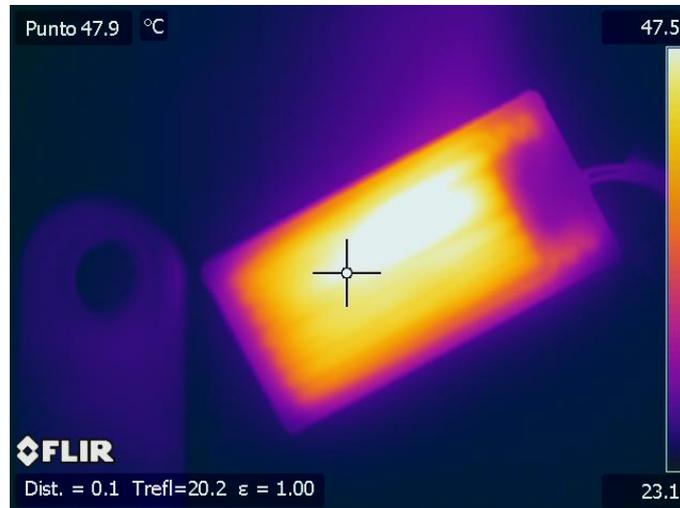
BaF₂



Termografía 9. Medida de la temperatura de la resistencia a 25,5 °C.



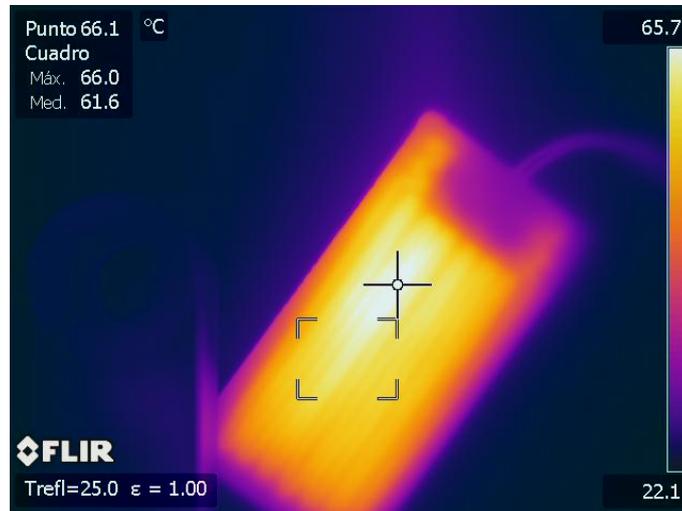
Termografía 10. Medida de la transmisividad del BaF₂ a 25,5°C.



Termografía 11. Medida de la temperatura de la resistencia a 47,9 °C.



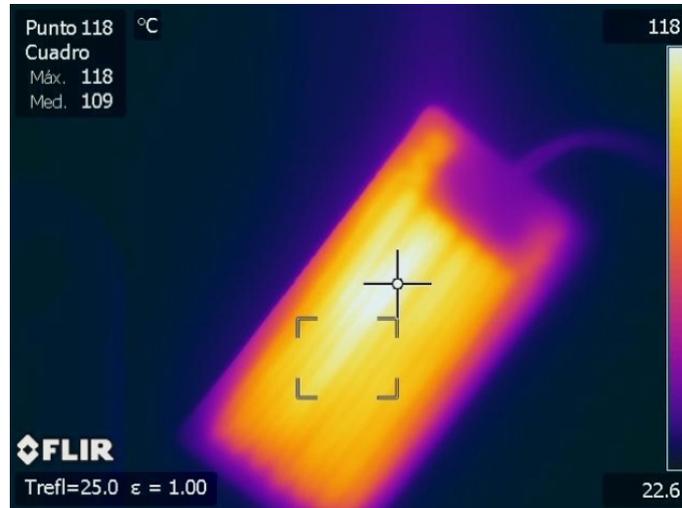
Termografía 12. Medida de la transmisividad del BaF2 a 47,9 °C.



Termografía 13. Medida de la temperatura de la resistencia a 66,1 °C.



Termografía 14. Medida de la transmisividad del BaF2 a 66,1°C.



Termografía 15. Medida de la temperatura de la resistencia a 118 °C.

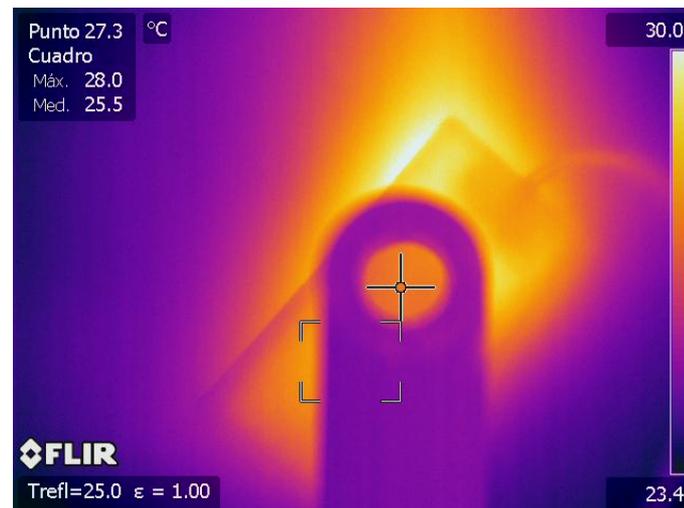


Termografía 16. Medida de la transmisividad del BaF2 a 118°C.

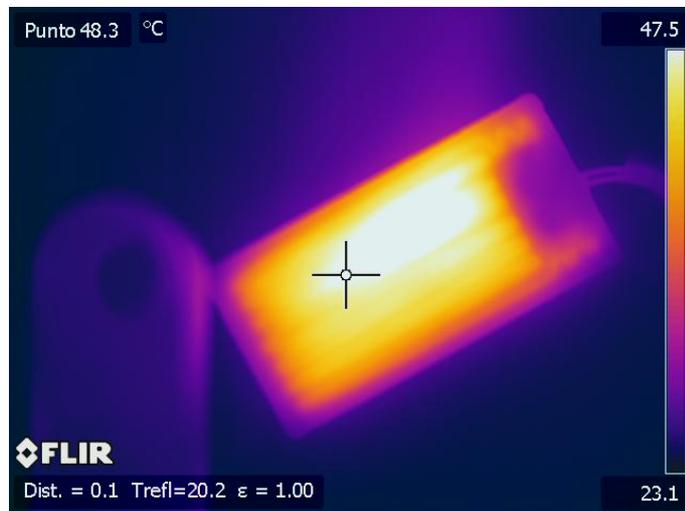
CaF₂



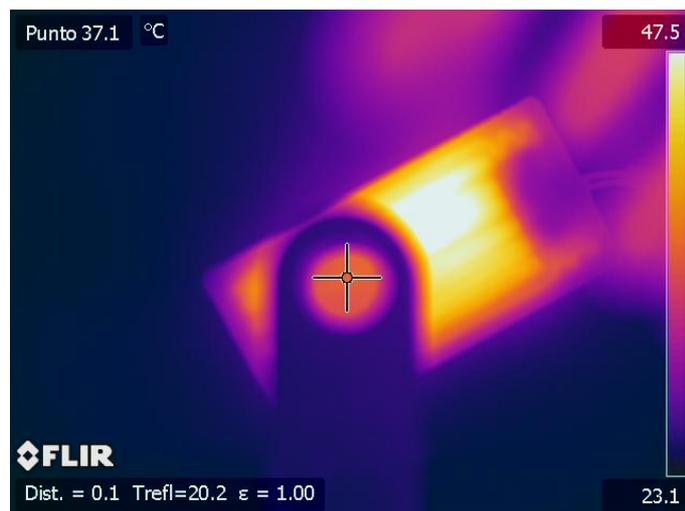
Termografía 17. Medida de la temperatura de la resistencia a 29,7 °C.



Termografía 18. Medida de la transmisividad del CaF₂ a 29,7°C.



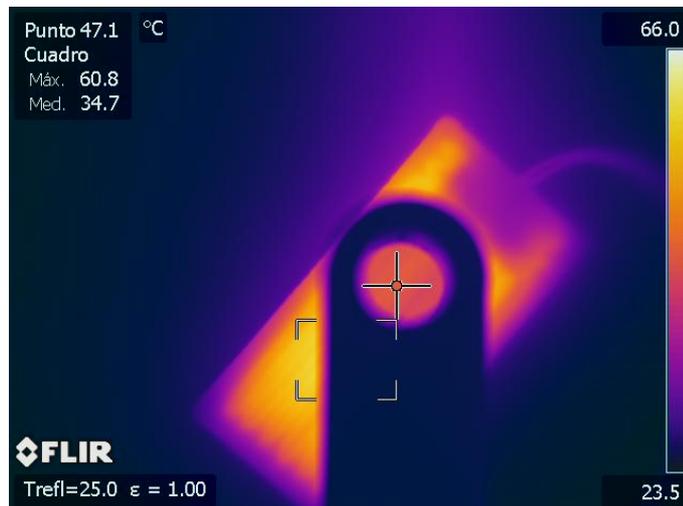
Termografía 19. Medida de la temperatura de la resistencia a 48,3 °C.



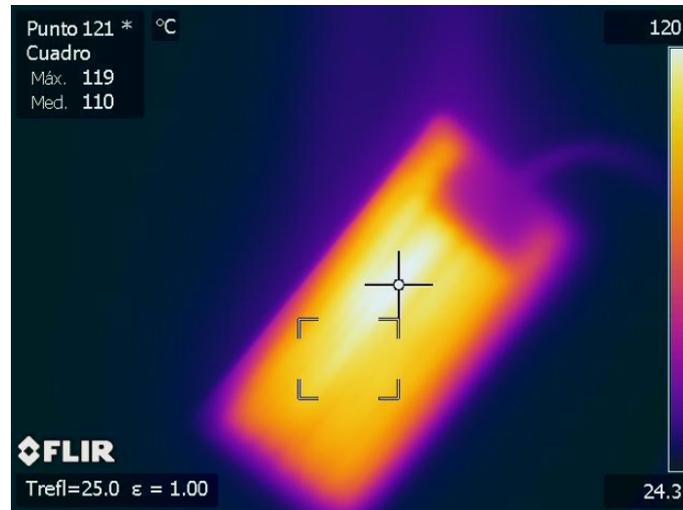
Termografía 20. Medida de la transmisividad del CaF2 a 48,3 °C.



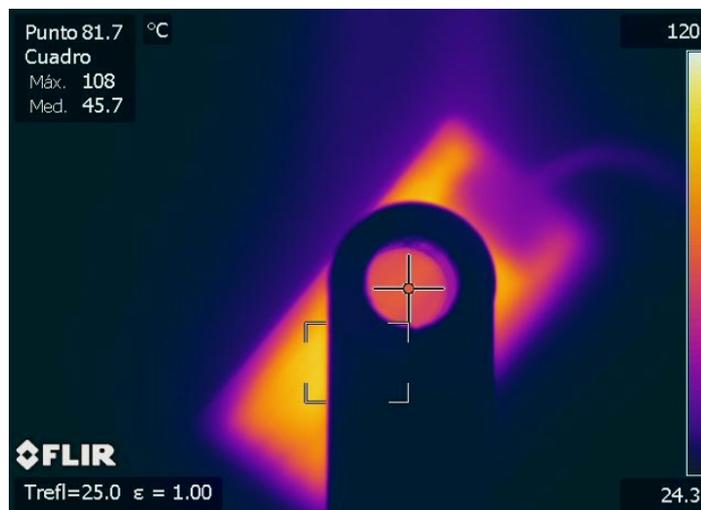
Termografía 21. Medida de la temperatura de la resistencia a 66,3 °C.



Termografía 22. Medida de la transmisividad del CaF2 a 66,3 °C.



Termografía 23. Medida de la temperatura de la resistencia a 121 °C.



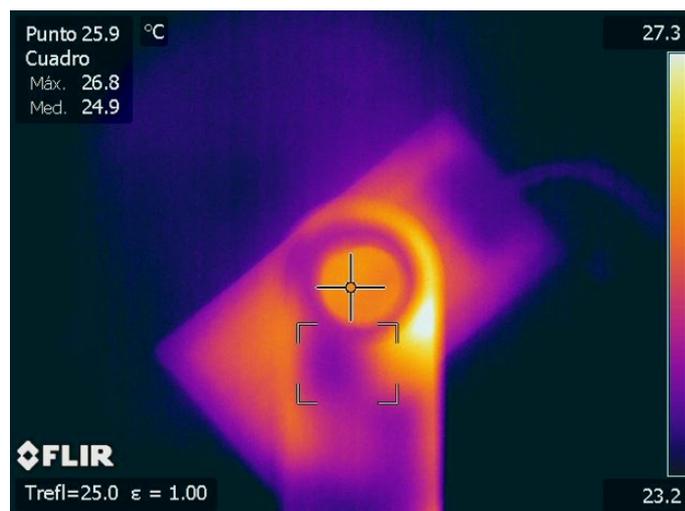
Termografía 24. Medida de la transmisividad del CaF2 a 121°C.

ENSAYO NÚMERO 2

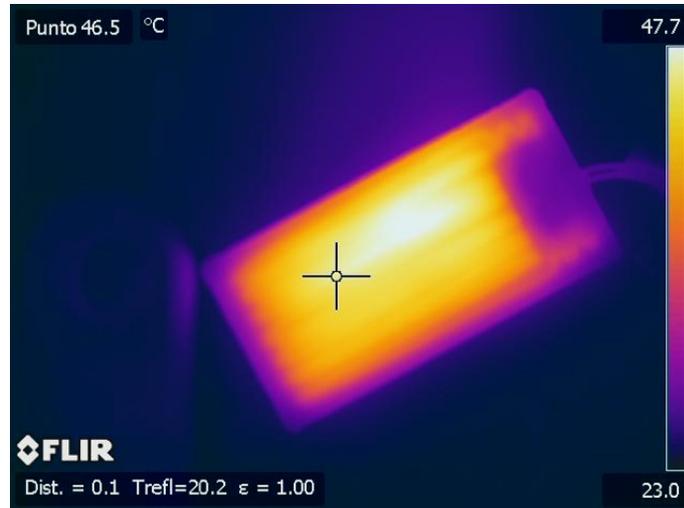
NaCl



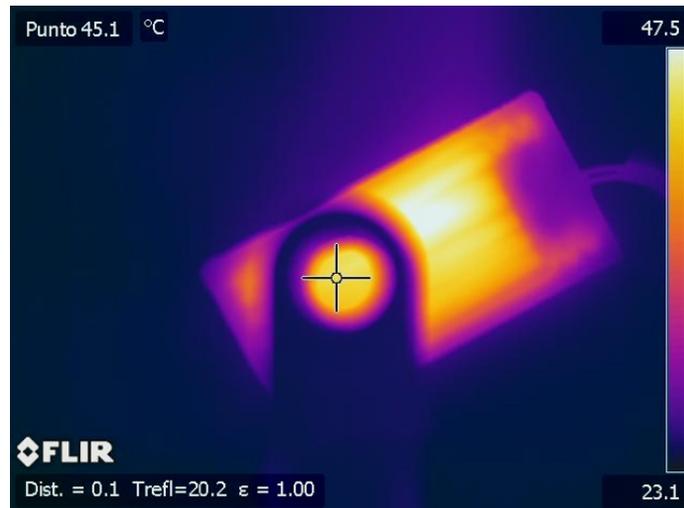
Termografía 25. Medida de la temperatura de la resistencia a 25,7 °C.



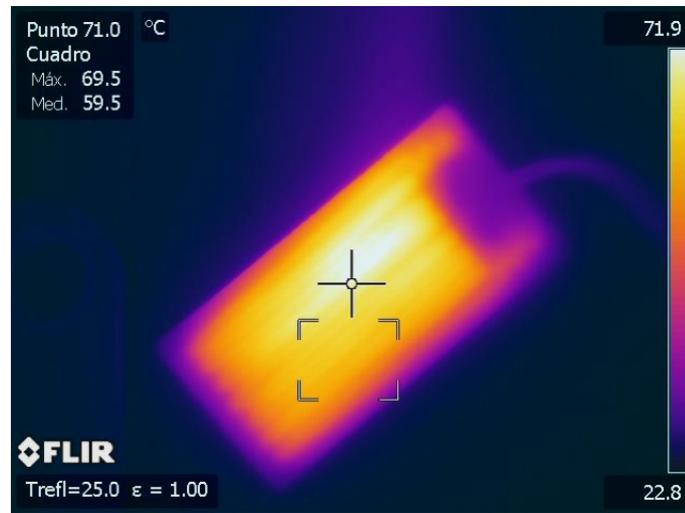
Termografía 26. Medida de la transmisividad del NaCl a 25,7°C.



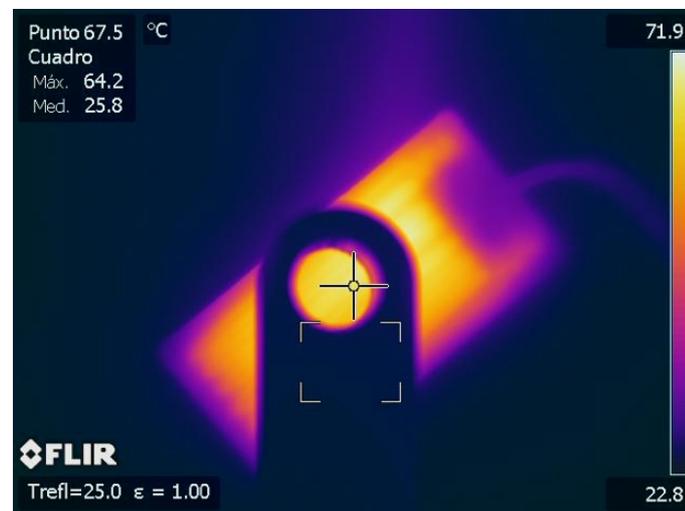
Termografía 27. Medida de la temperatura de la resistencia a 46,5 °C.



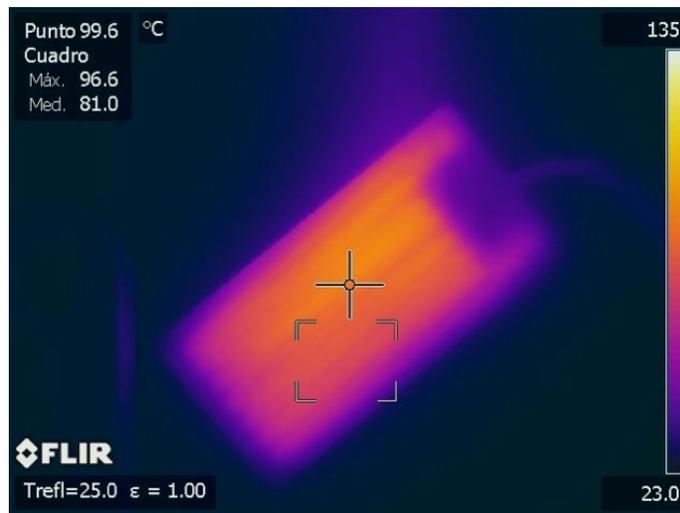
Termografía 28. Medida de la transmisividad del NaCl a 46,5 °C.



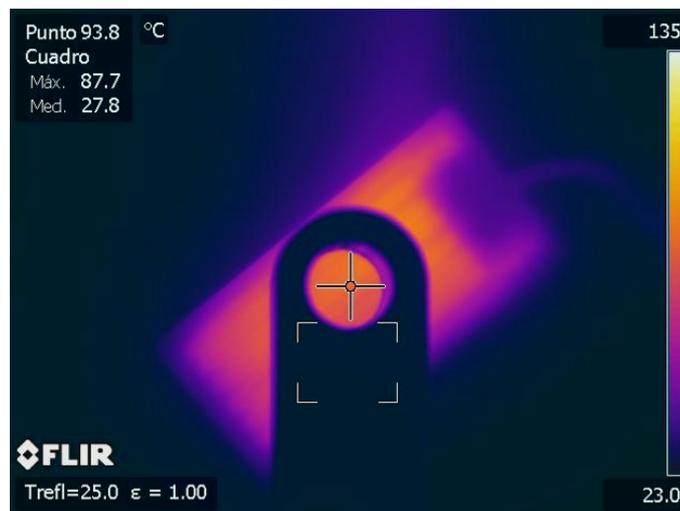
Termografía 29. Medida de la temperatura de la resistencia a 71 °C.



Termografía 30. Medida de la transmisividad del NaCl a 71°C.

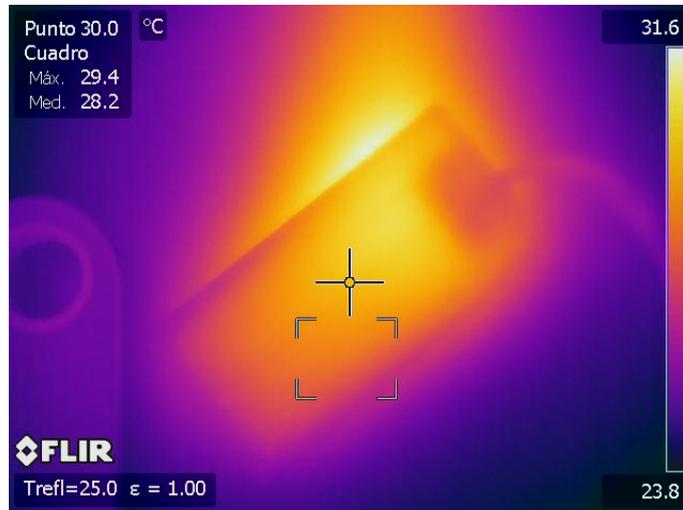


Termografía 31. Medida de la temperatura de la resistencia a 99,6 °C.

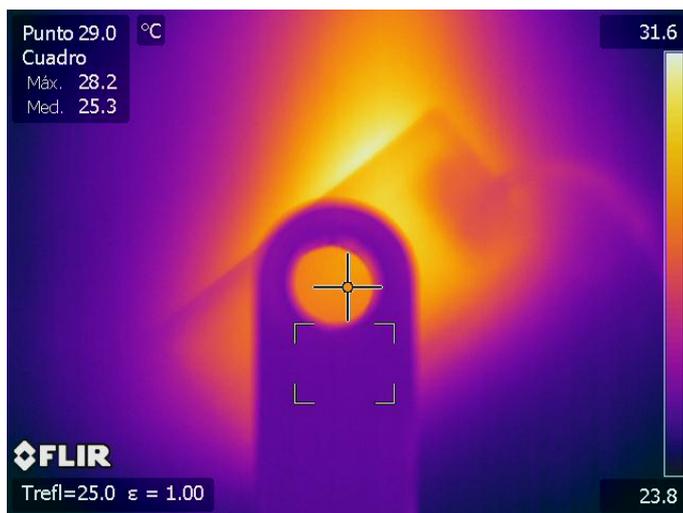


Termografía 32. Medida de la transmisividad del NaCl a 99,6°C.

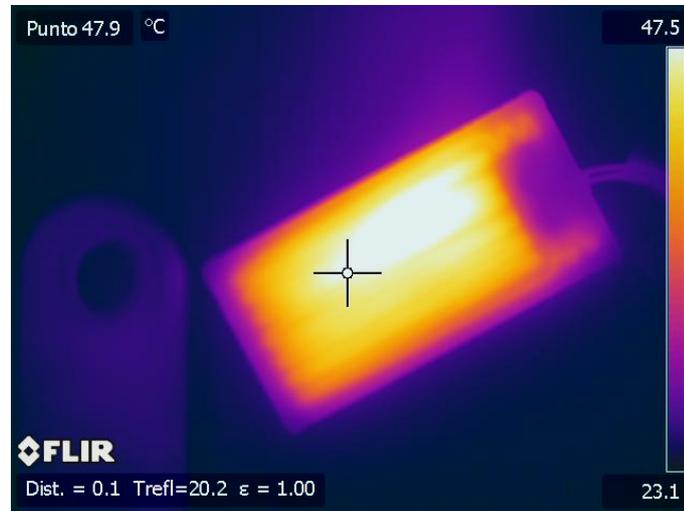
BaF₂



Termografía 33. Medida de la temperatura de la resistencia a 30 °C.



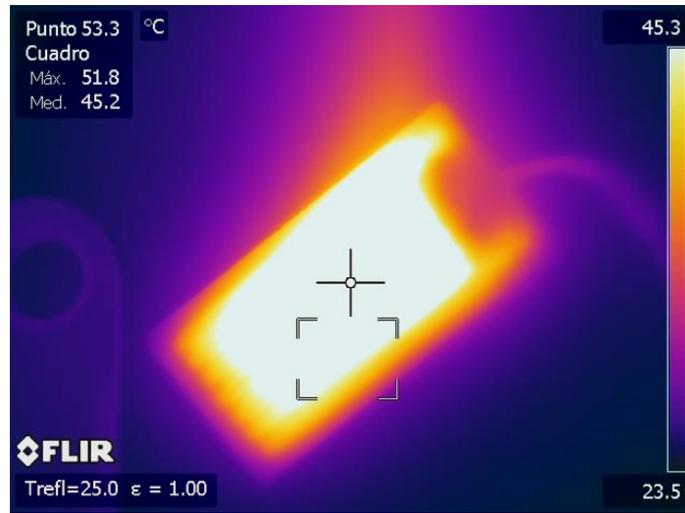
Termografía 34. Medida de la transmisividad del BaF₂ a 30 °C.



Termografía 35. Medida de la temperatura de la resistencia a 47,9 °C.



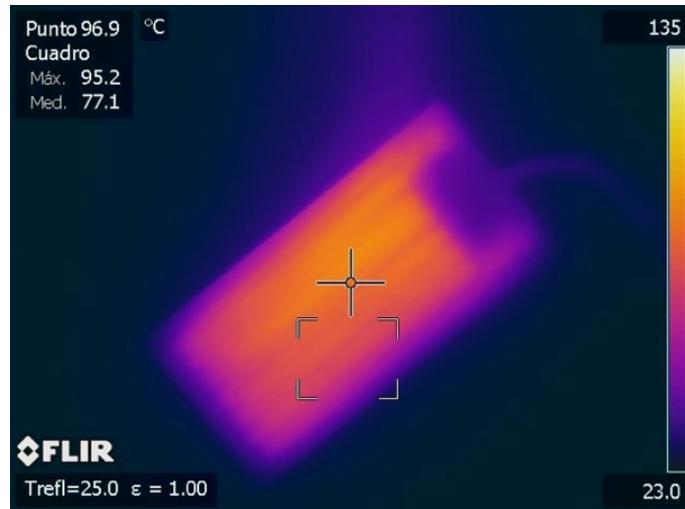
Termografía 36. Medida de la transmisividad del BaF2 a 47,9 °C.



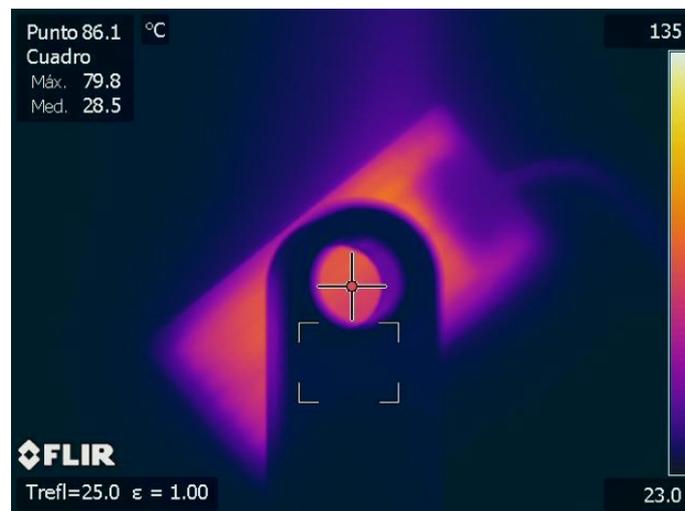
Termografía 37. Medida de la temperatura de la resistencia a 53,3 °C.



Termografía 38. Medida de la transmisividad del BaF2 a 53,3°C.

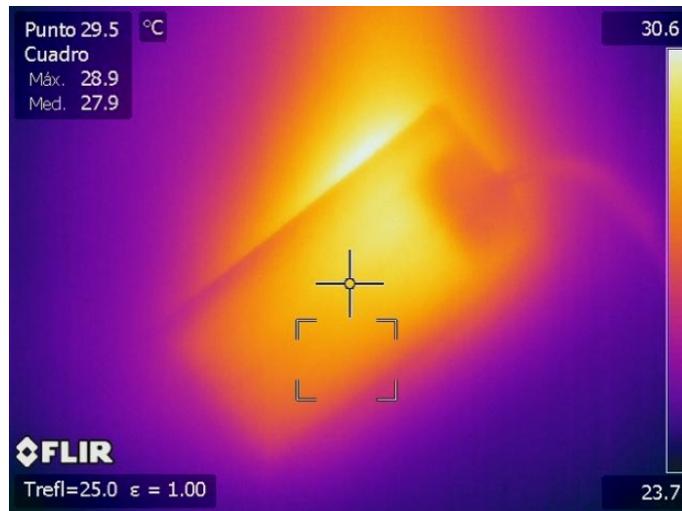


Termografía 39. Medida de la temperatura de la resistencia a 96,9 °C.



Termografía 40. Medida de la transmisividad del BaF2 a 96,9°C.

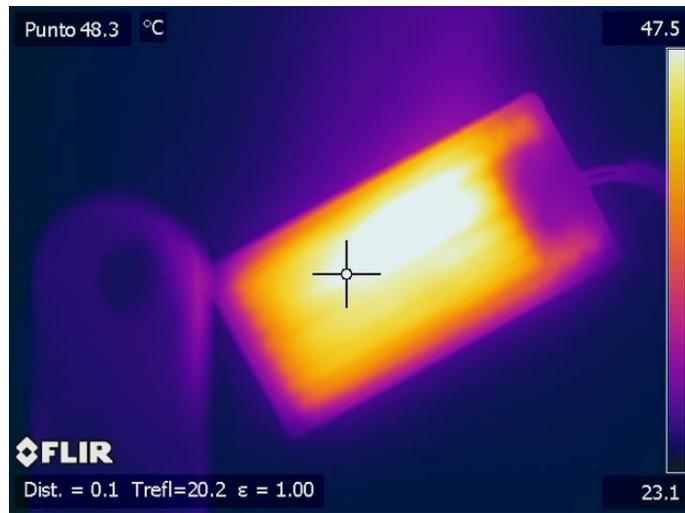
CaF₂



Termografía 41. Medida de la temperatura de la resistencia a 29,5 °C.



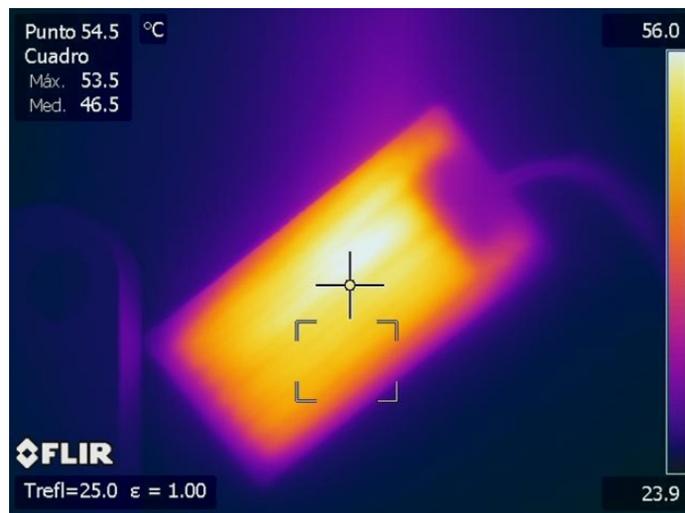
Termografía 42. Medida de la transmisividad del CaF₂ a 29,5°C.



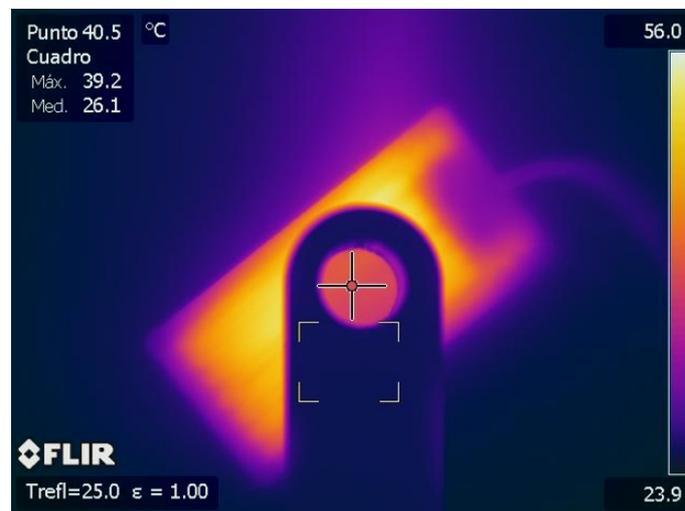
Termografía 43. Medida de la temperatura de la resistencia a 48,3 °C.



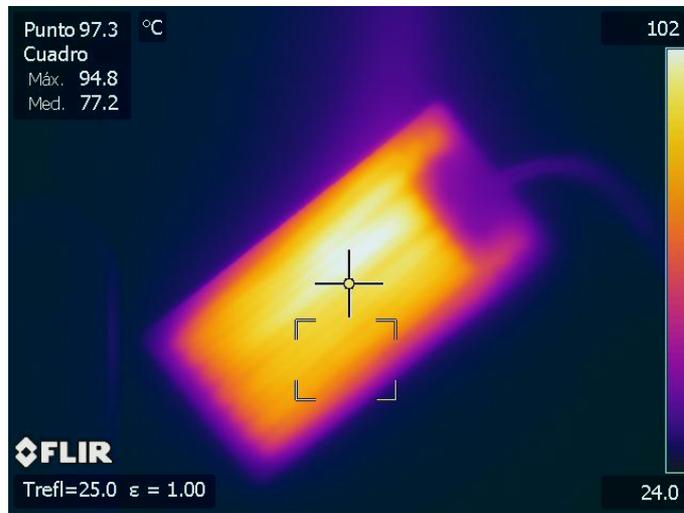
Termografía 44. Medida de la transmisividad del CaF2 a 48,3 °C.



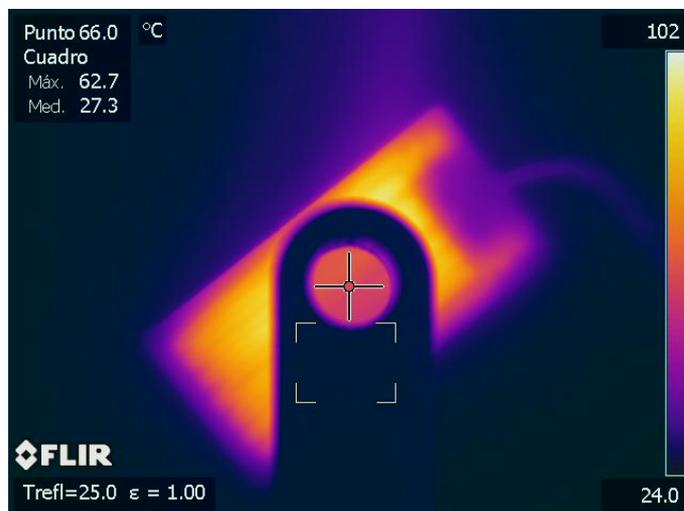
Termografía 45. Medida de la temperatura de la resistencia a 54,5 °C.



Termografía 46. Medida de la transmisividad del CaF2 a 54,5°C.

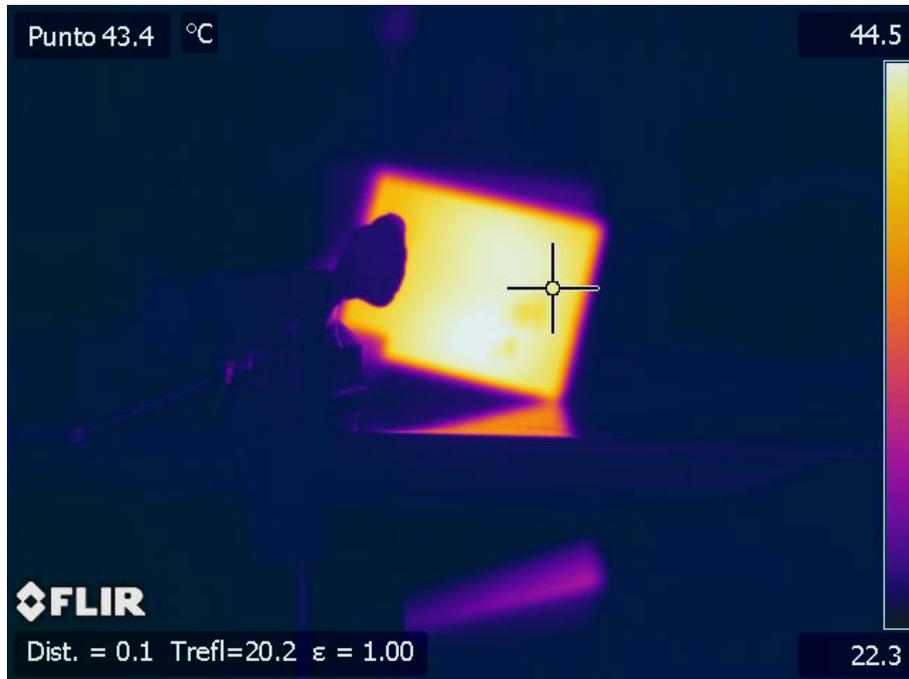


Termografía 47. Medida de la temperatura de la resistencia a 97,3 °C.



Termografía 48. Medida de la transmisividad del CaF2 a 97,3°C.

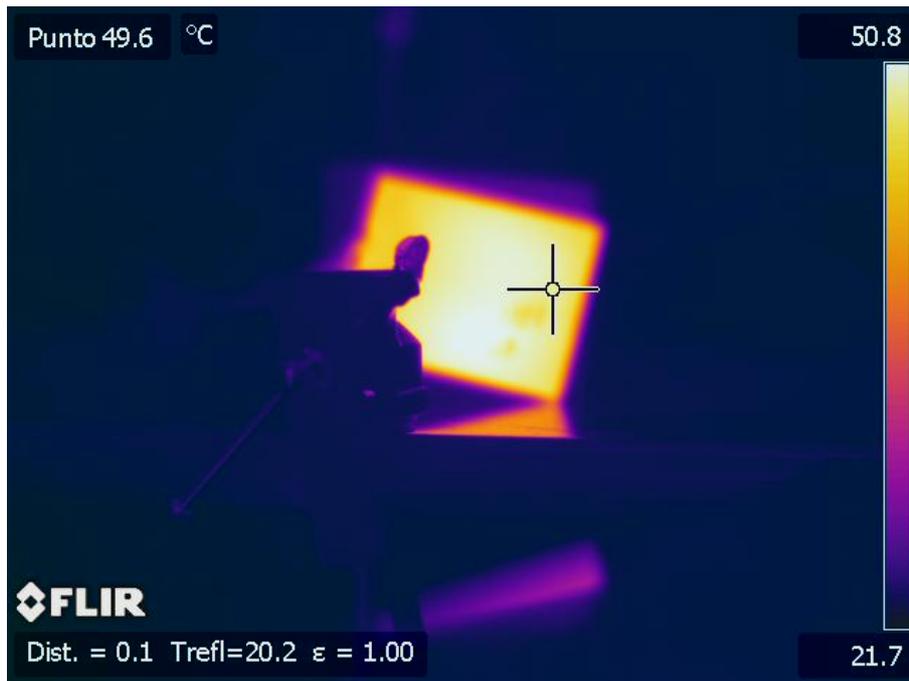
2. COMPROBACIÓN DE PROPIEDADES ÓPTICAS DE VARIOS MATERIALES POLIMÉRICOS.



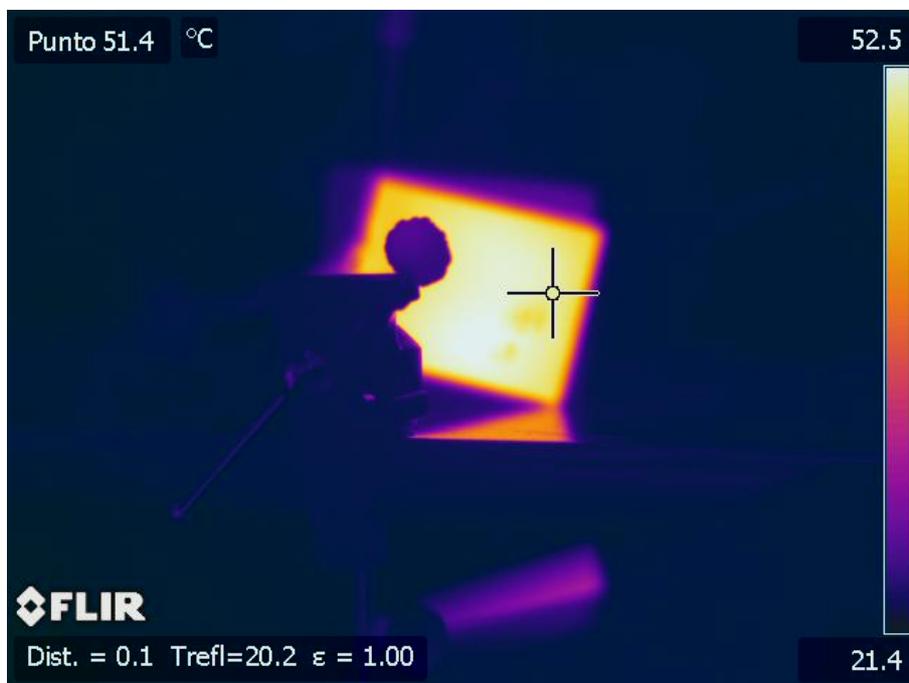
Termografía 49. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero PVC.



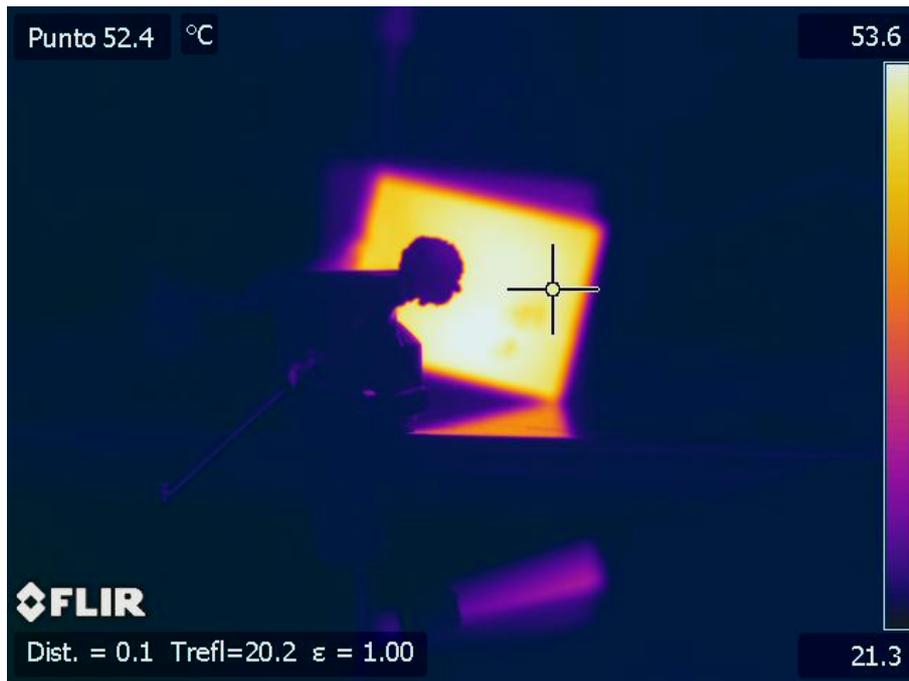
Termografía 50. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero ABS.



Termografía 51. Test de opacidad al infrarrojo para la cera de polipropileno.



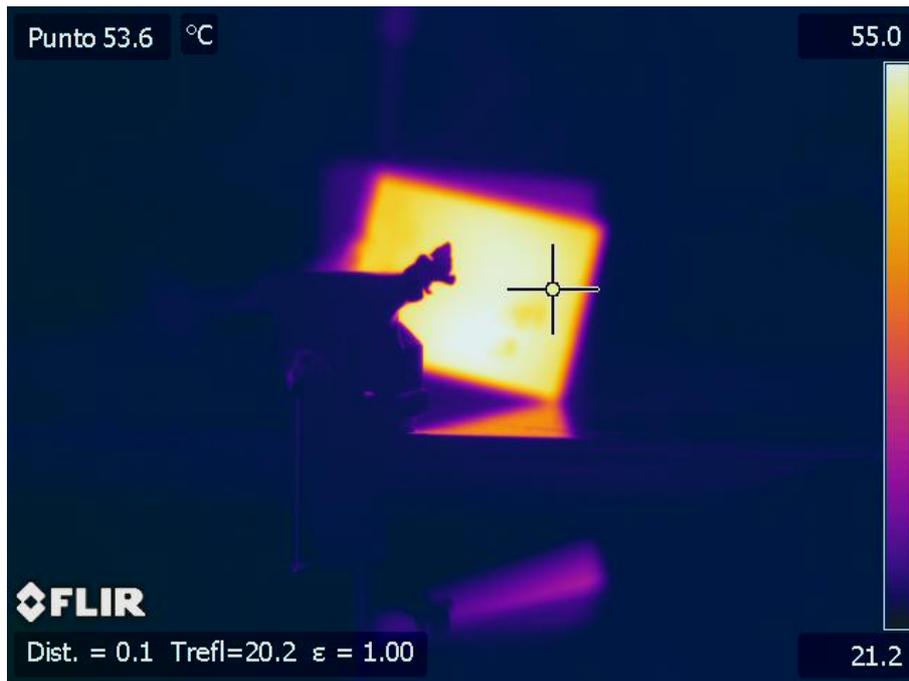
Termografía 52. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero poliestireno.



Termografía 53. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero PVA.



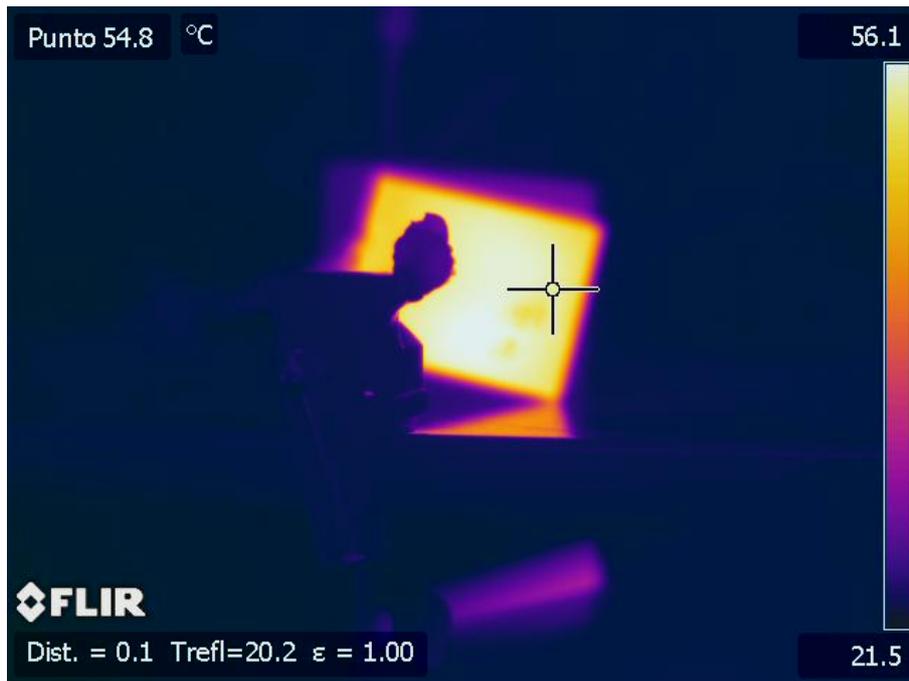
Termografía 54. Test de opacidad al infrarrojo para la resina EVA.



Termografía 55. Test de opacidad al infrarrojo para el "Epolene Wax".



Termografía 56. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero PLA.



Termografía 57. Test de opacidad al infrarrojo para el "Versaflex CL-2242".



Termografía 58. Test de opacidad al infrarrojo para el Parafilm.



Termografía 59. Test de opacidad al infrarrojo para el polímero policarbonato.



Termografía 60. Test de opacidad al infrarrojo para la placa de polipropileno.

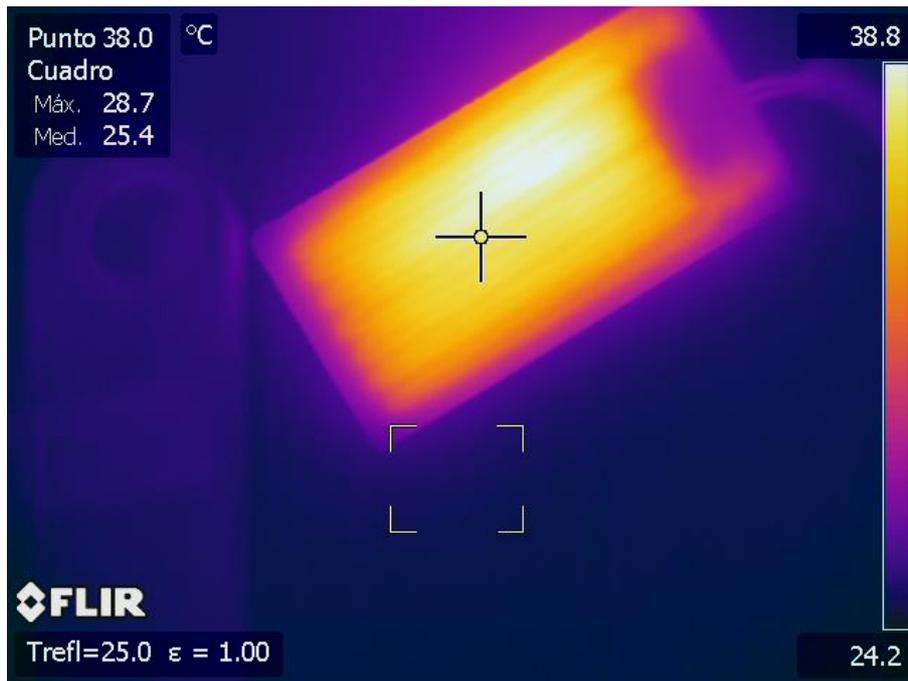
3. MEDIDAS DE TRANSMISIVIDADES DEL CRISTAL DE NACL RECUBIERTO CON PARAFILM.



Termografía 61. Medida de la temperatura de la resistencia a 27,3 °C.



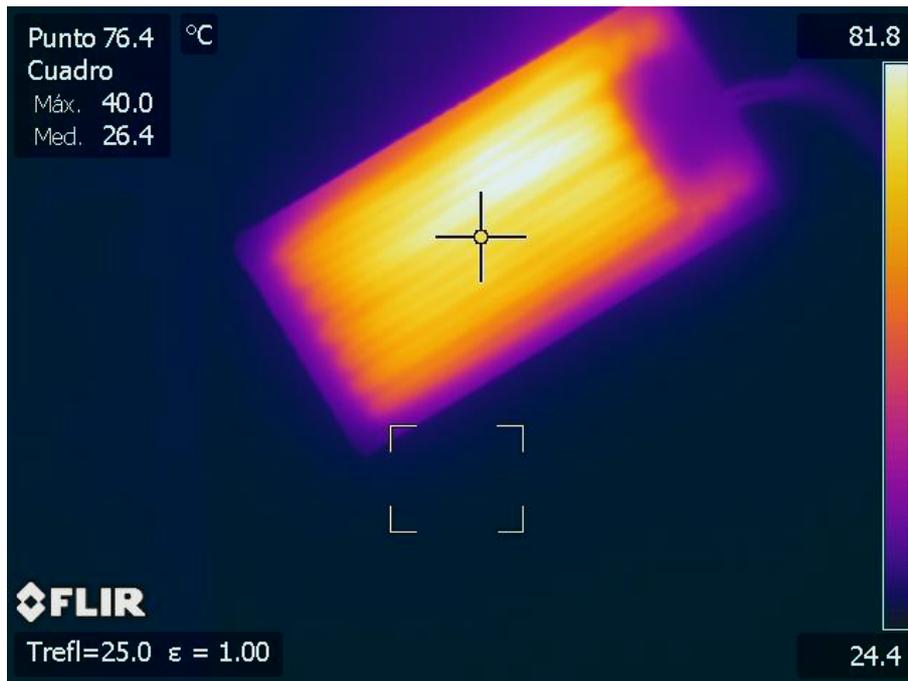
Termografía 62. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 27,3 °C.



Termografía 63. Medida de la temperatura de la resistencia a 38 °C.



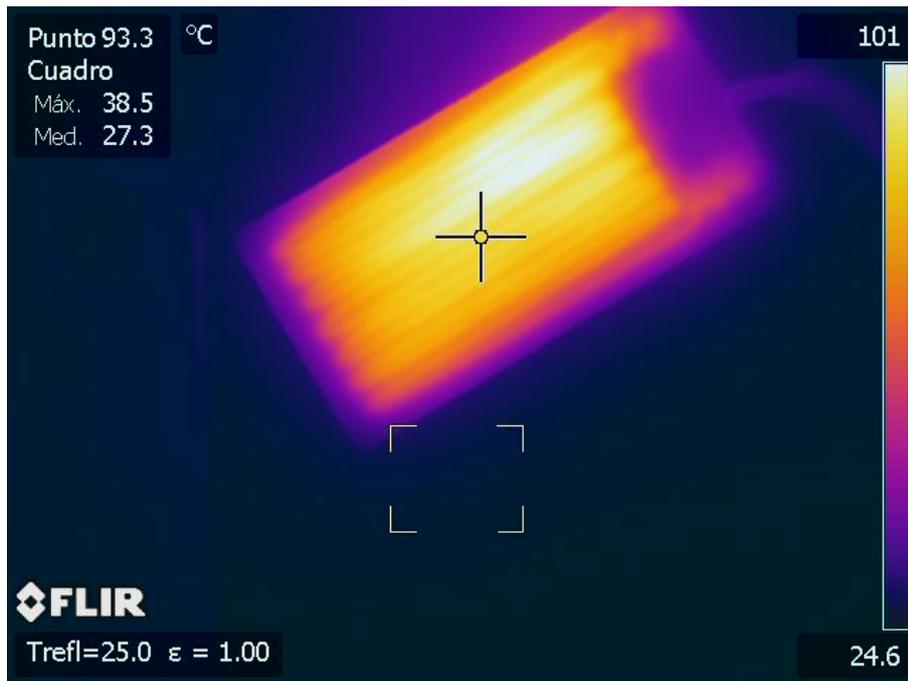
Termografía 64. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 36,1 °C.



Termografía 65. Medida de la temperatura de la resistencia a 76,4 °C.



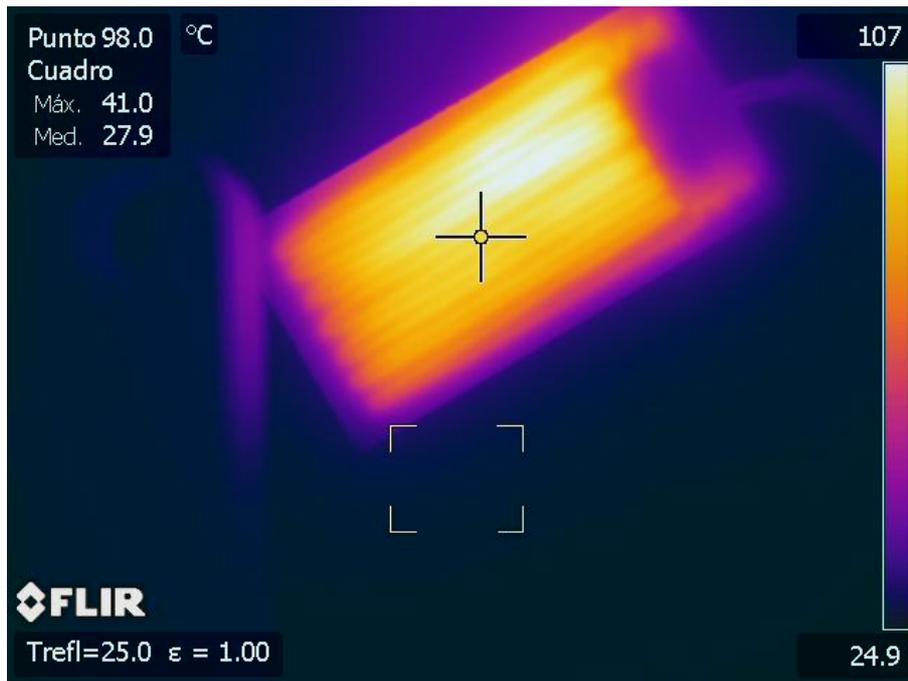
Termografía 66. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 76,4 °C.



Termografía 67. Medida de la temperatura de la resistencia a 93,3 °C.



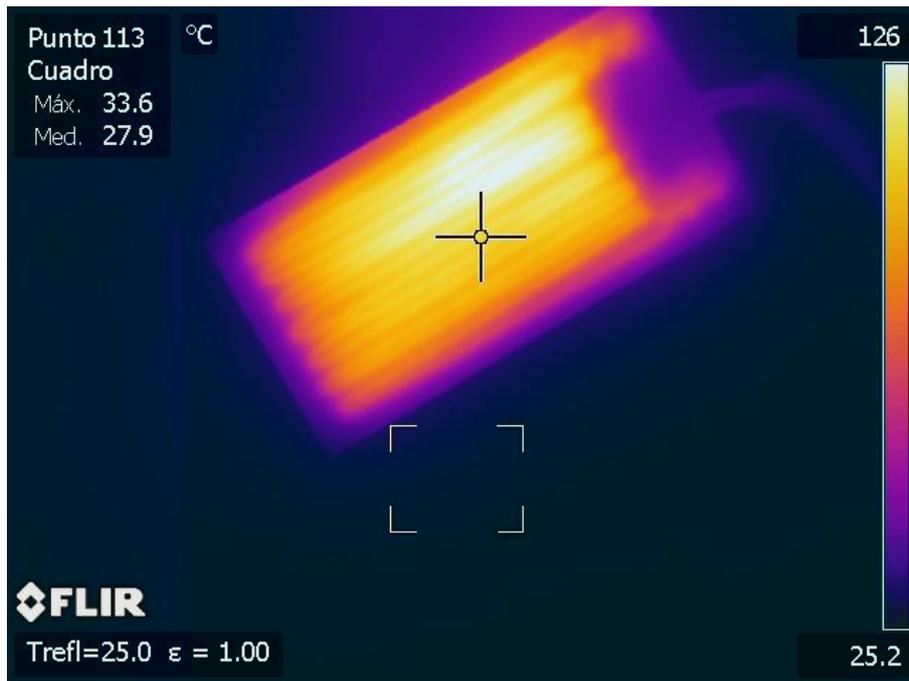
Termografía 68. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 93,3 °C.



Termografía 69. Medida de la temperatura de la resistencia a 98 °C.



Termografía 70. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 98 °C.



Termografía 71. Medida de la temperatura de la resistencia a 113 °C.

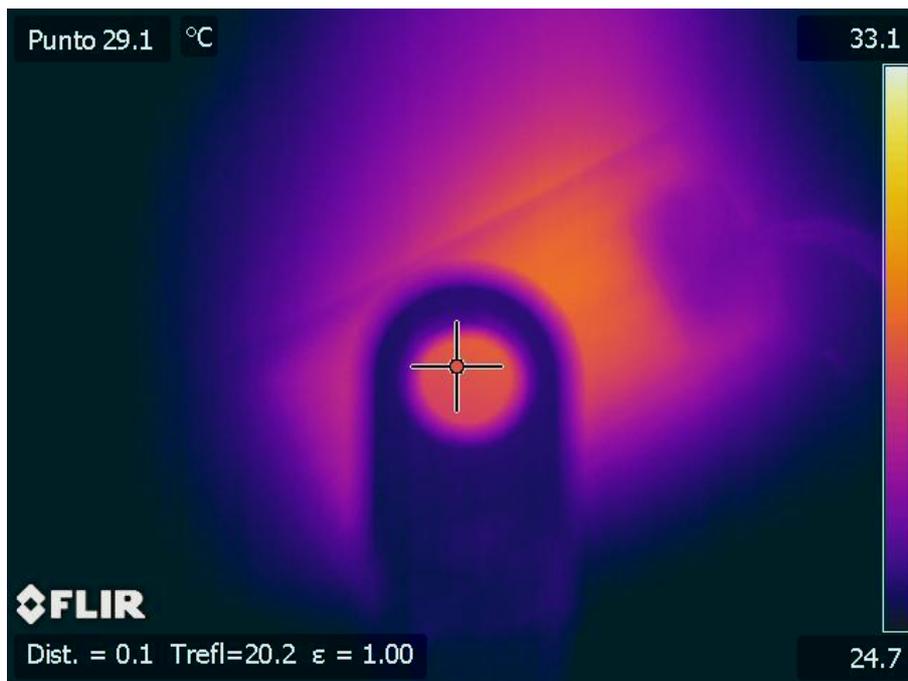


Termografía 72. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Parafilm a 113 °C.

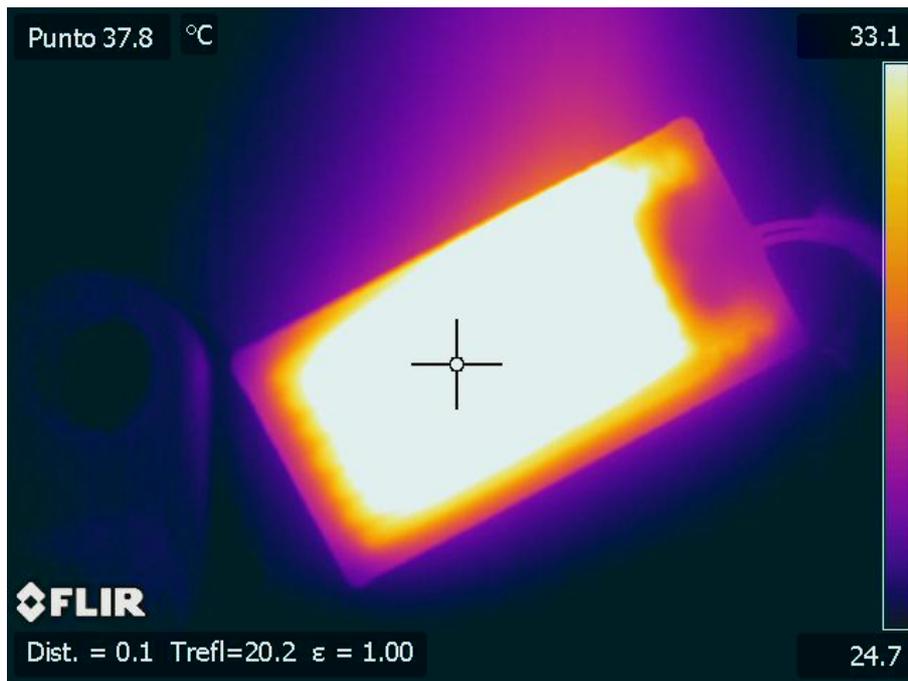
4. MEDIDAS DE TRANSMISIVIDADES DEL CRISTAL DE NACL RECUBIERTO CON POLIETILENO.



Termografía 73. Medida de la temperatura de la resistencia a 29,4 °C.



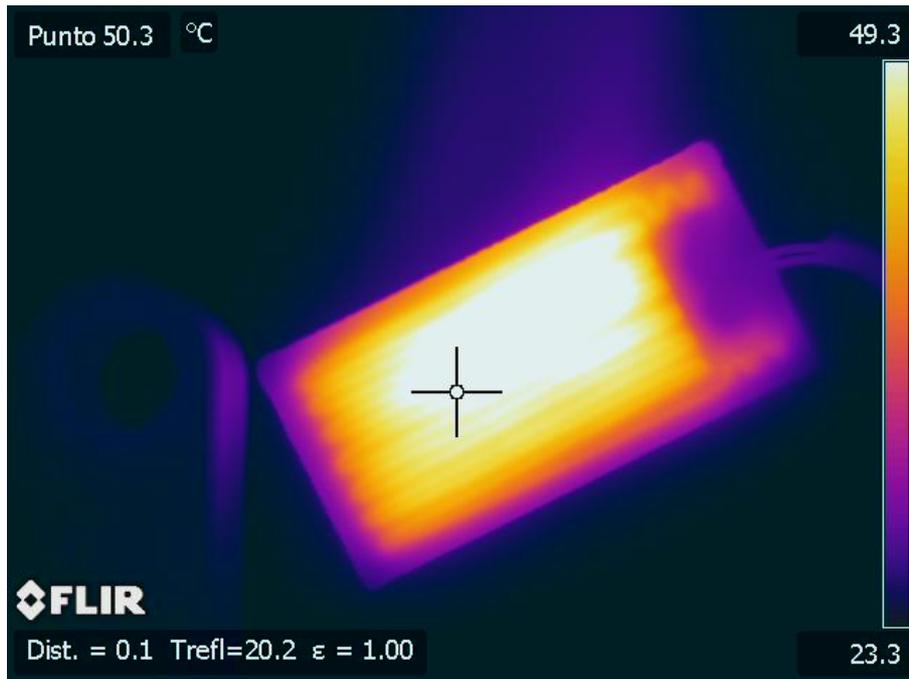
Termografía 74. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 29,4 °C.



Termografía 75. Medida de la temperatura de la resistencia a 37,8 °C.



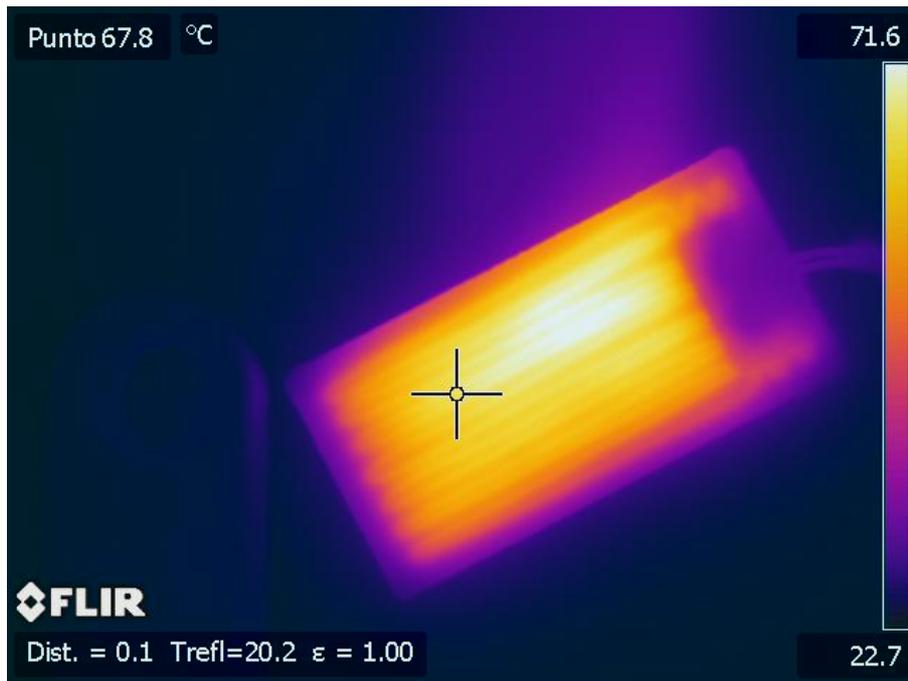
Termografía 76. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 37,5 °C.



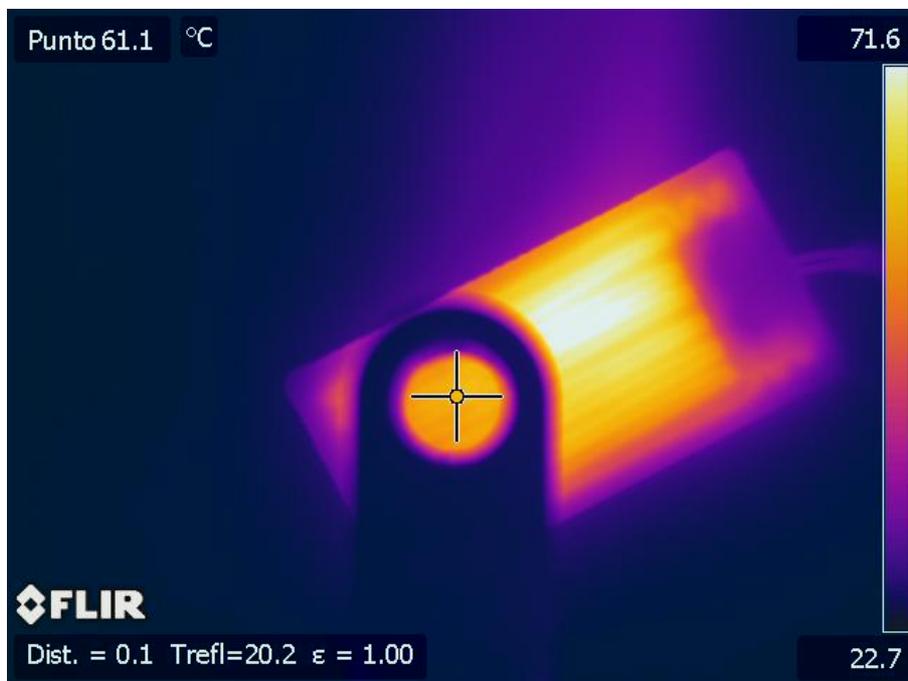
Termografía 77. Medida de la temperatura de la resistencia a 50,3 °C.



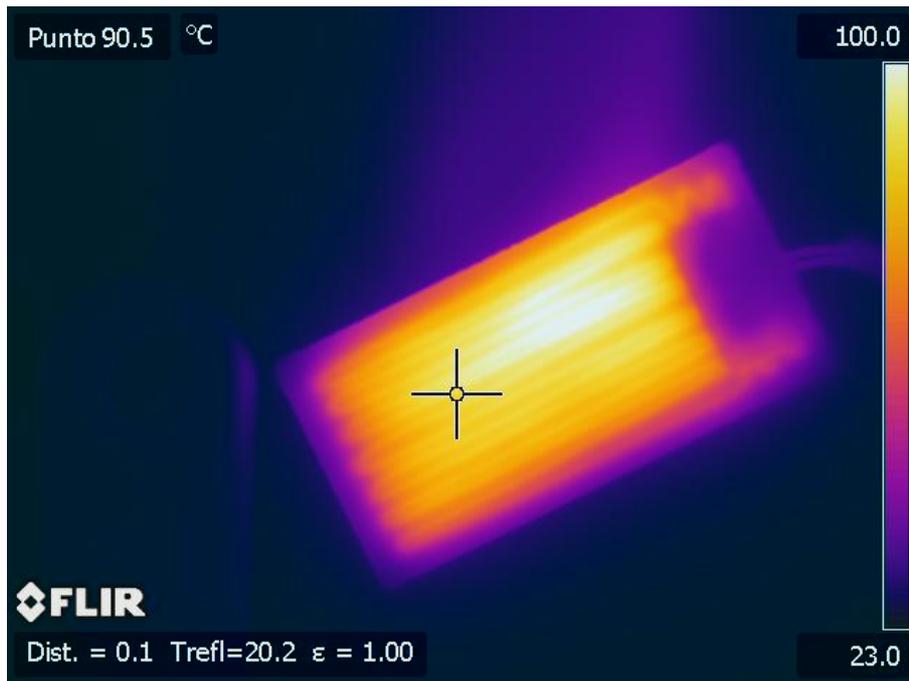
Termografía 78. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 50,3 °C.



Termografía 79. Medida de la temperatura de la resistencia a 67,8 °C.



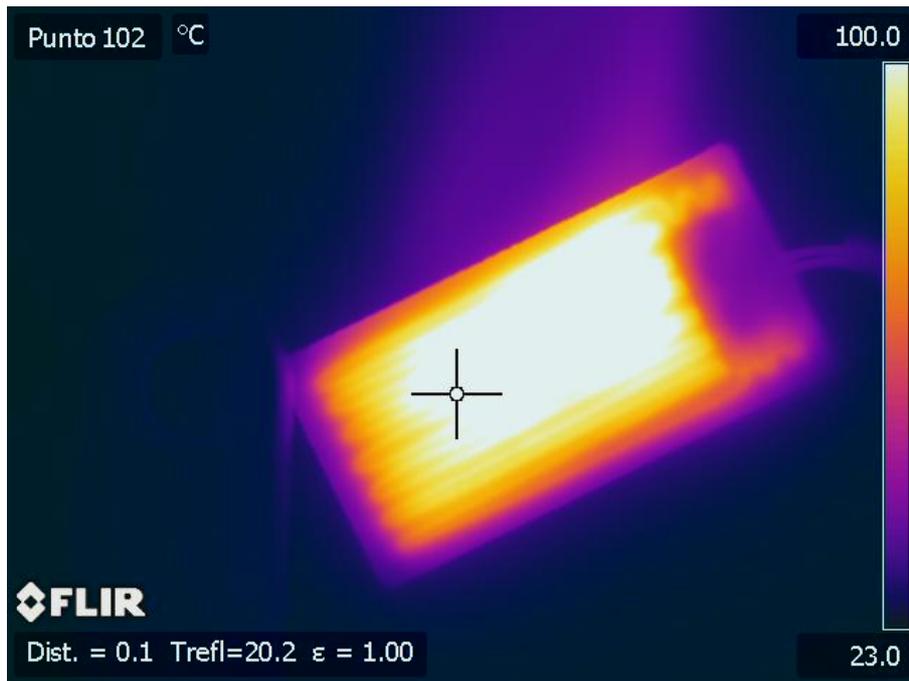
Termografía 80. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 67,8 °C.



Termografía 81. Medida de la temperatura de la resistencia a 90,5 °C.



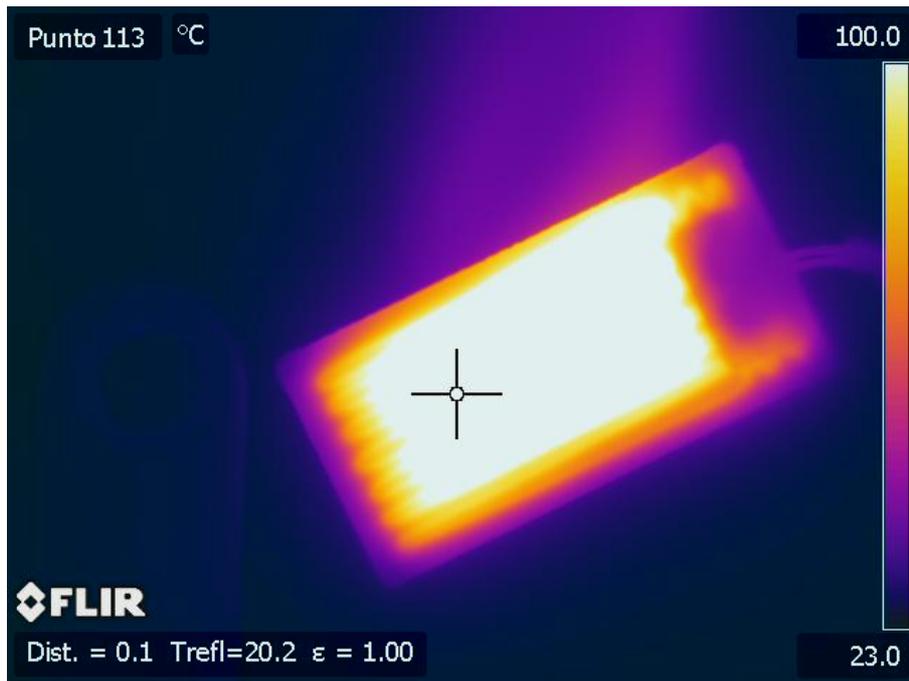
Termografía 82. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 90,5 °C.



Termografía 83. Medida de la temperatura de la resistencia a 102 °C.



Termografía 84. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 102 °C.



Termografía 85. Medida de la temperatura de la resistencia a 113 °C.



Termografía 86. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Polietileno a 113 °C.

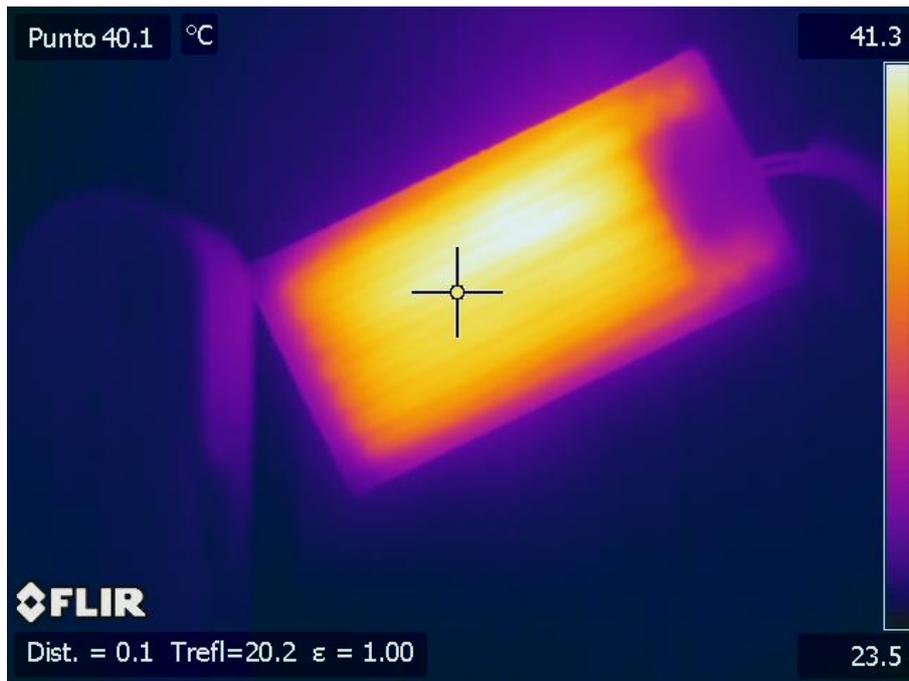
5. MEDIDAS DE TRANSMISIVIDADES DEL CRISTAL DE NA₂CO₃ RECUBIERTO CON CINTA ADHESIVA.



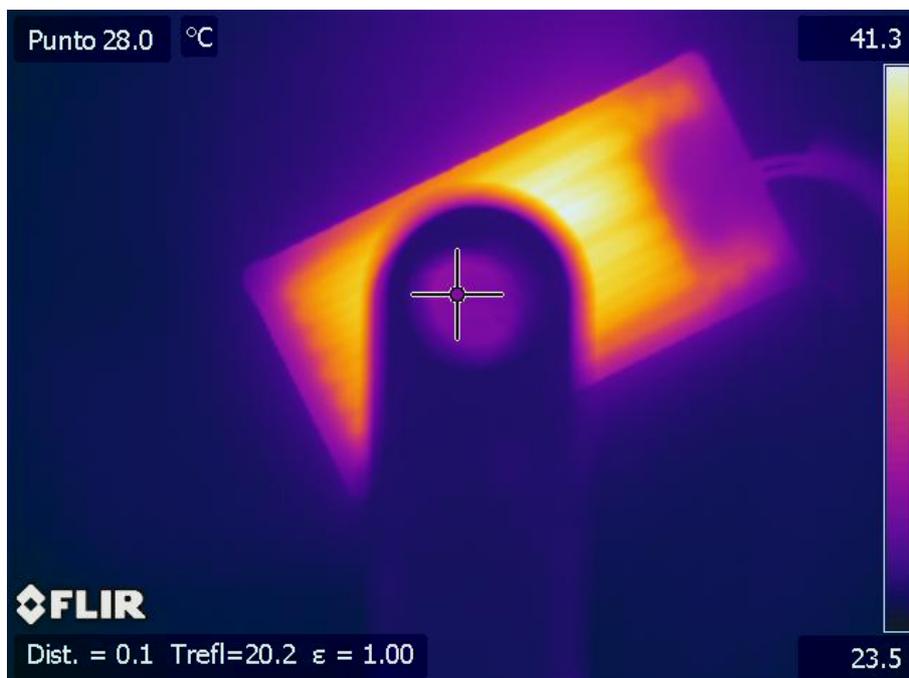
Termografía 87. Medida de la temperatura de la resistencia a 26,9 °C.



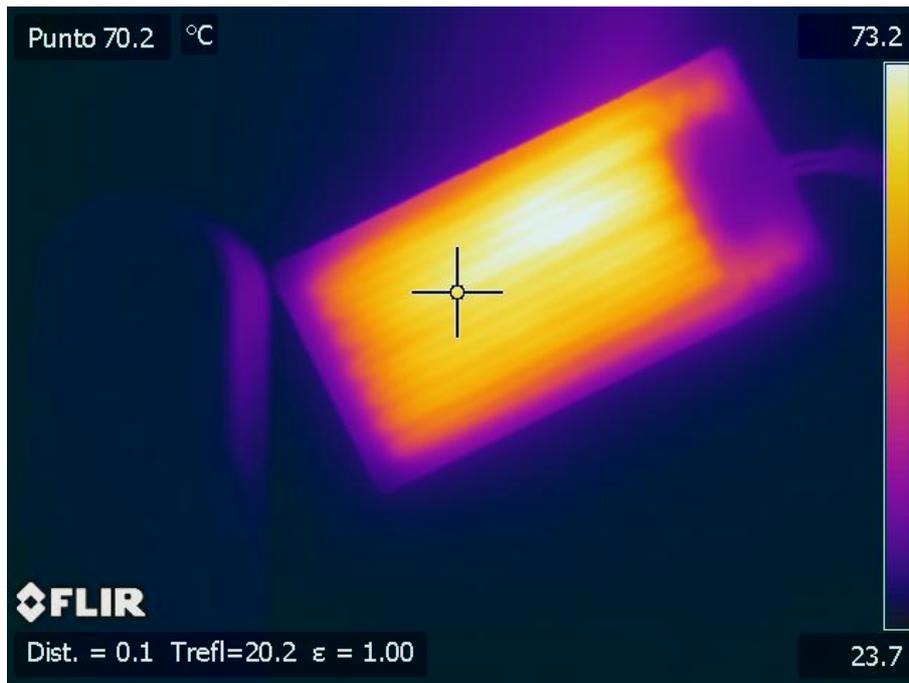
Termografía 88. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Cinta adhesiva a 26,9 °C.



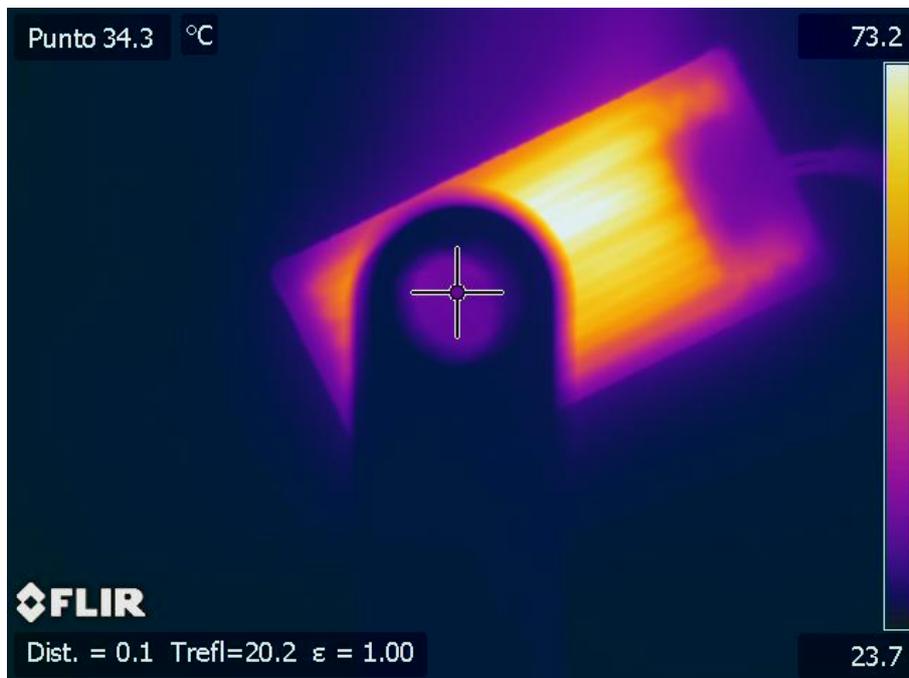
Termografía 89. Medida de la temperatura de la resistencia a 40,1 °C.



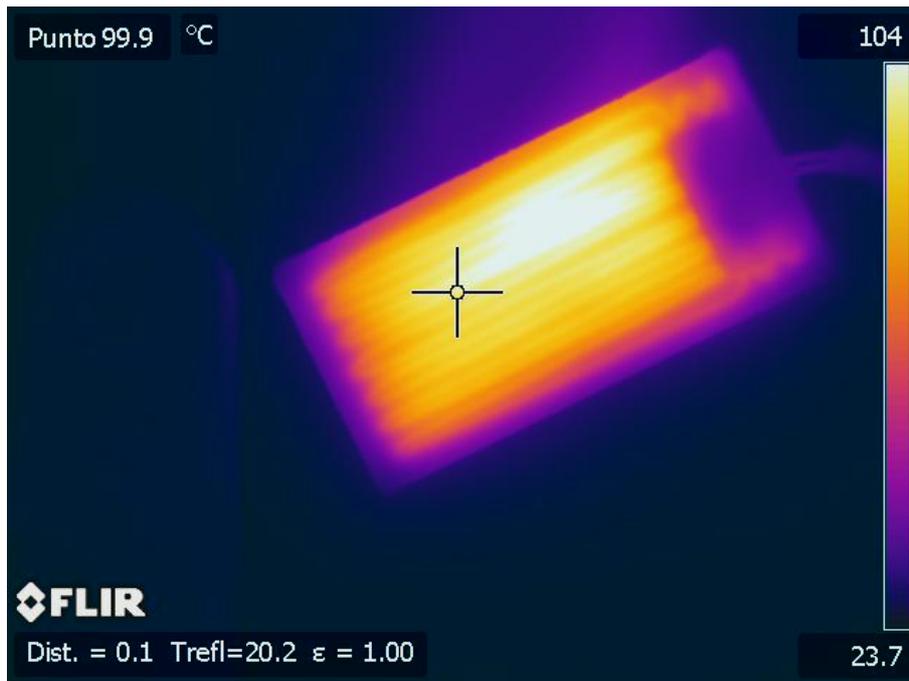
Termografía 90. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Cinta adhesiva a 40,1 °C.



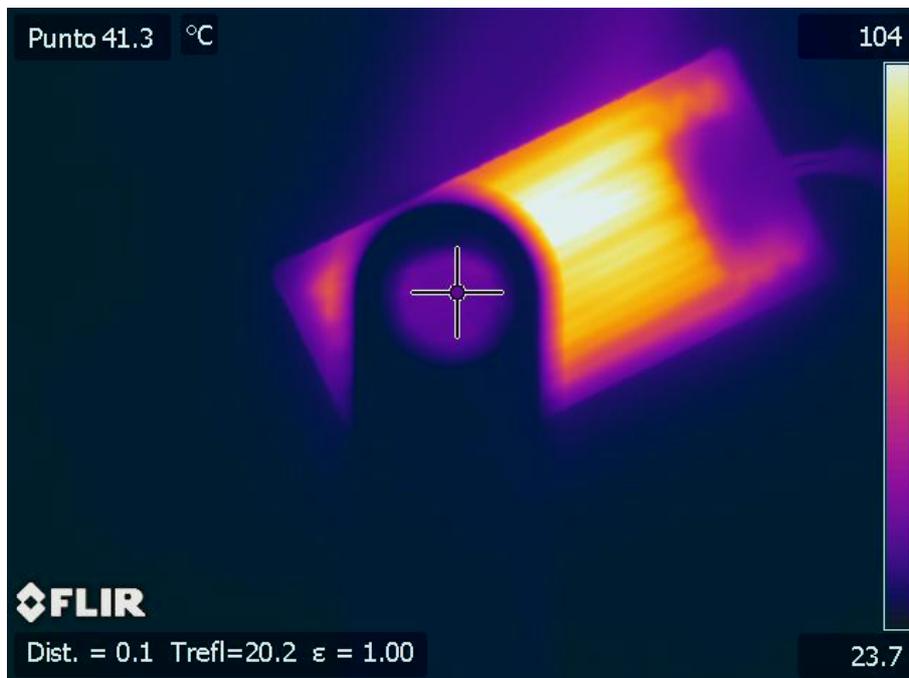
Termografía 91. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,2 °C.



Termografía 92. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Cinta adhesiva a 70,2 °C.



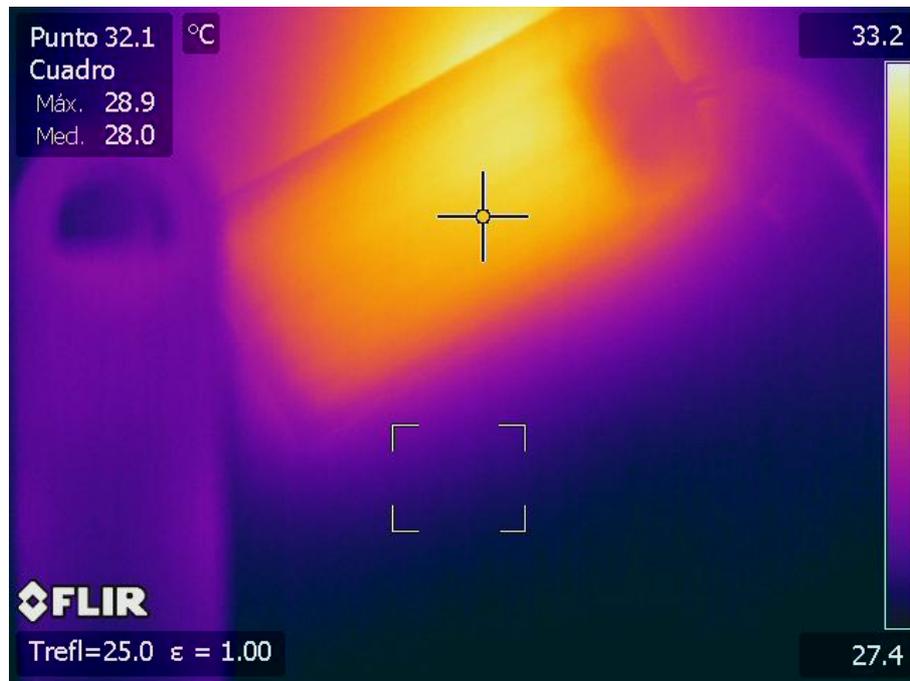
Termografía 93. Medida de la temperatura de la resistencia a 99,9 °C.



Termografía 94. Medida de la transmisividad del NaCl recubierto con Cinta adhesiva a 99,9 °C.

6. MEDIDAS DE TRANSMISIVIDADES DEL CRISTAL DE NACl DE DIFERENTES ESPESORES.

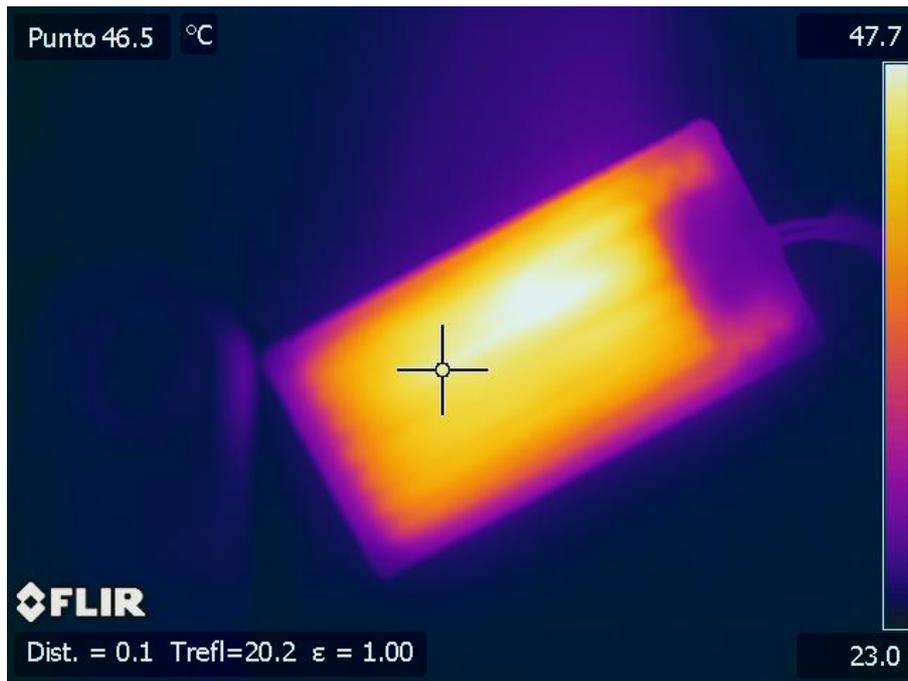
8 mm DE ESPESOR:



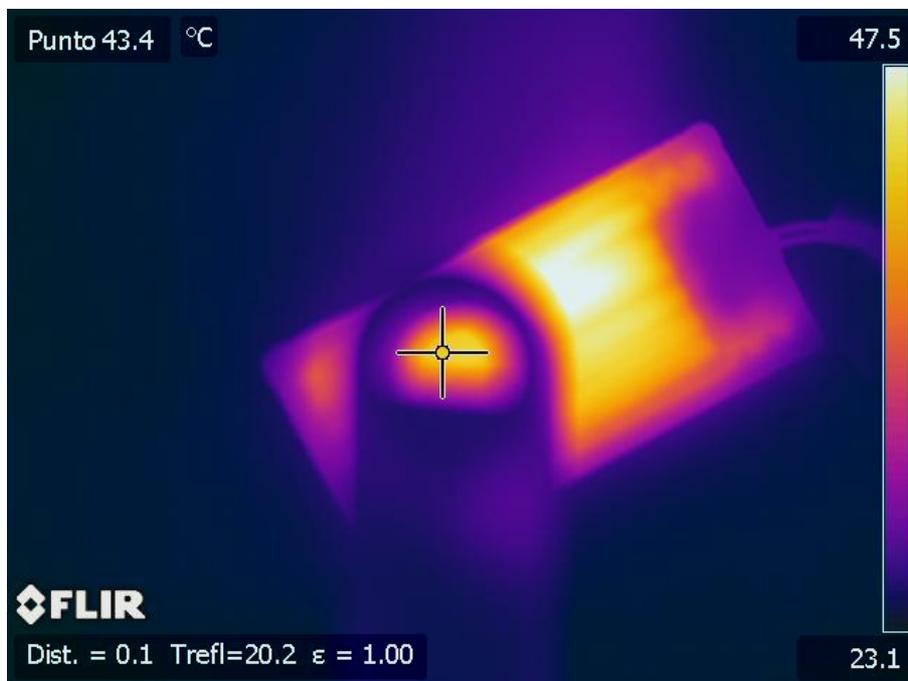
Termografía 95. Medida de la temperatura de la resistencia a 32,1 °C.



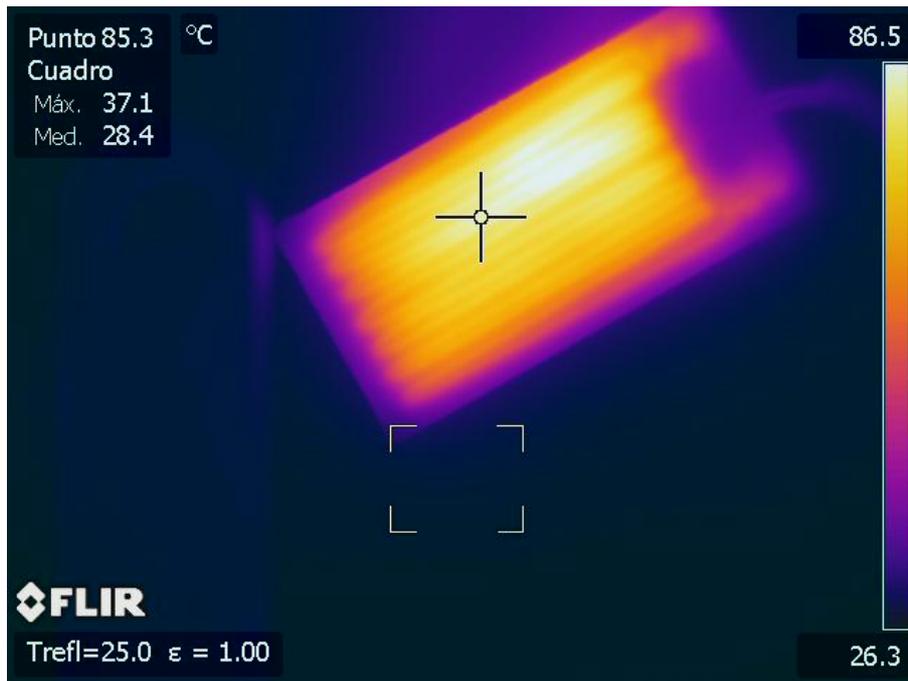
Termografía 96. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 8 mm a 32,1 °C.



Termografía 97. Medida de la temperatura de la resistencia a 46,5 °C.



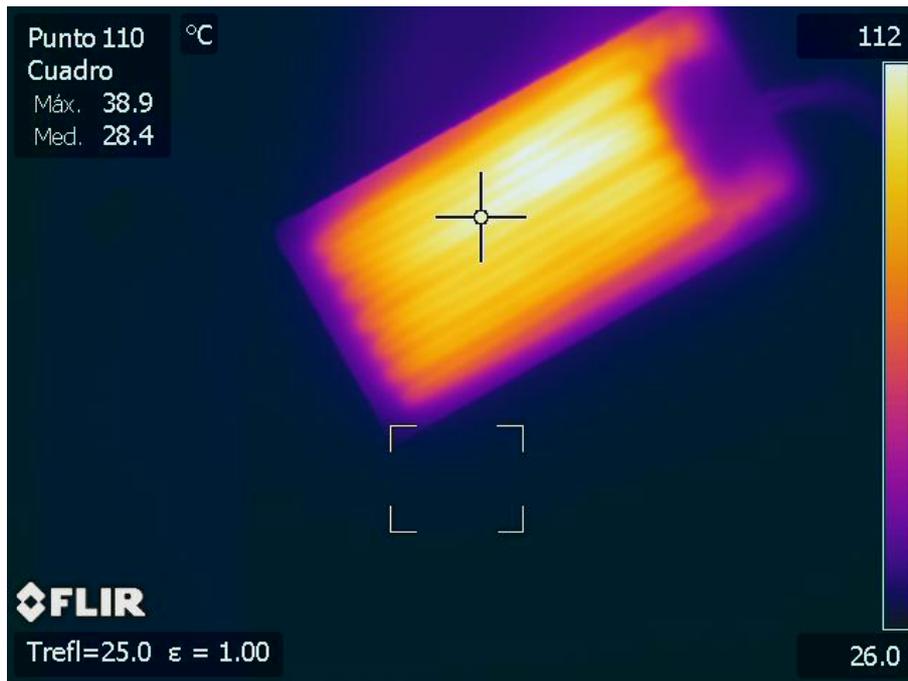
Termografía 98. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 8 mm a 46,5 °C.



Termografía 99. Medida de la temperatura de la resistencia a 85,3 °C.



Termografía 100. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 8 mm a 85,3 °C.



Termografía 101. Medida de la temperatura de la resistencia a 110 °C.

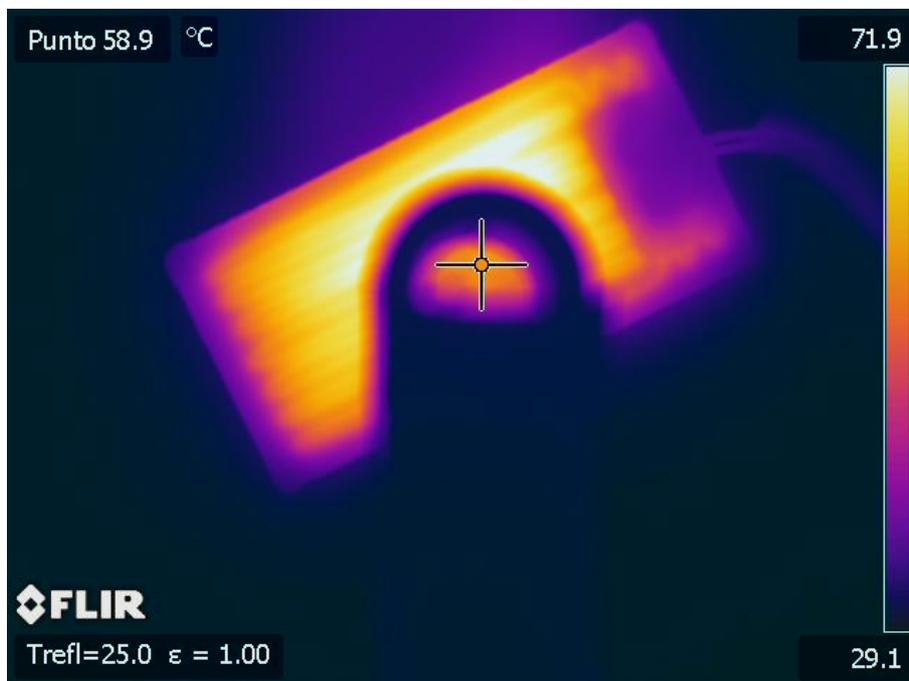


Termografía 102. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 8 mm a 110 °C.

12 mm DE ESPESOR:



Termografía 103. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,3 °C.

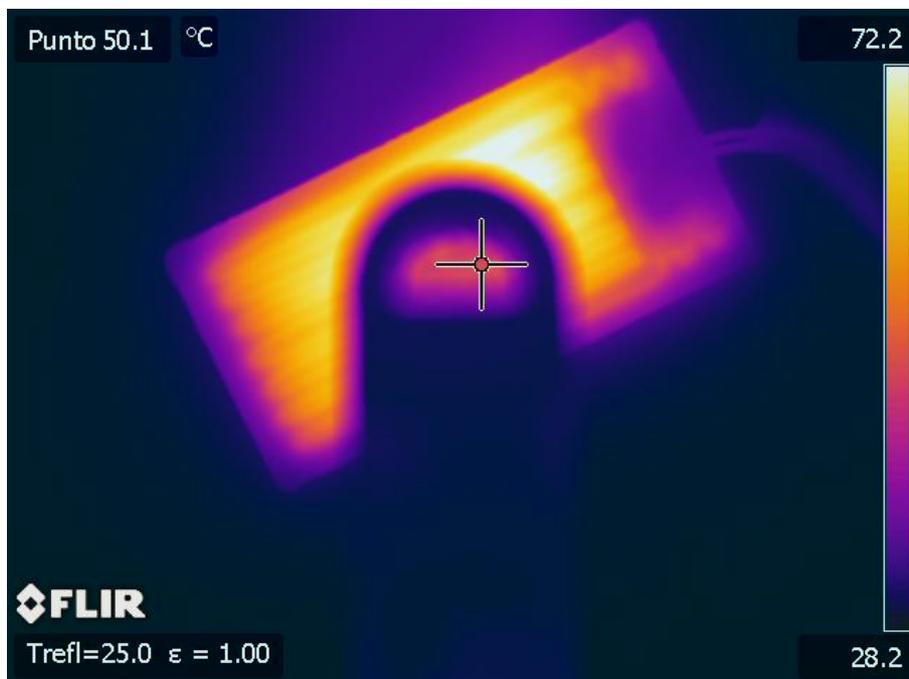


Termografía 104. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 12 mm a 70,3 °C.

16 mm DE ESPESOR:



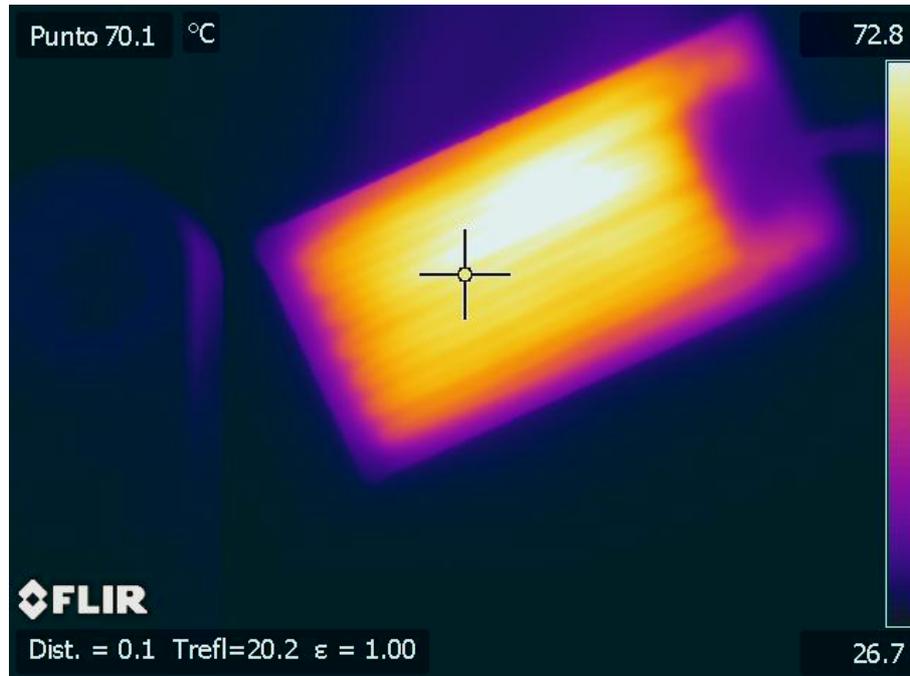
Termografía 105. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,3 °C.



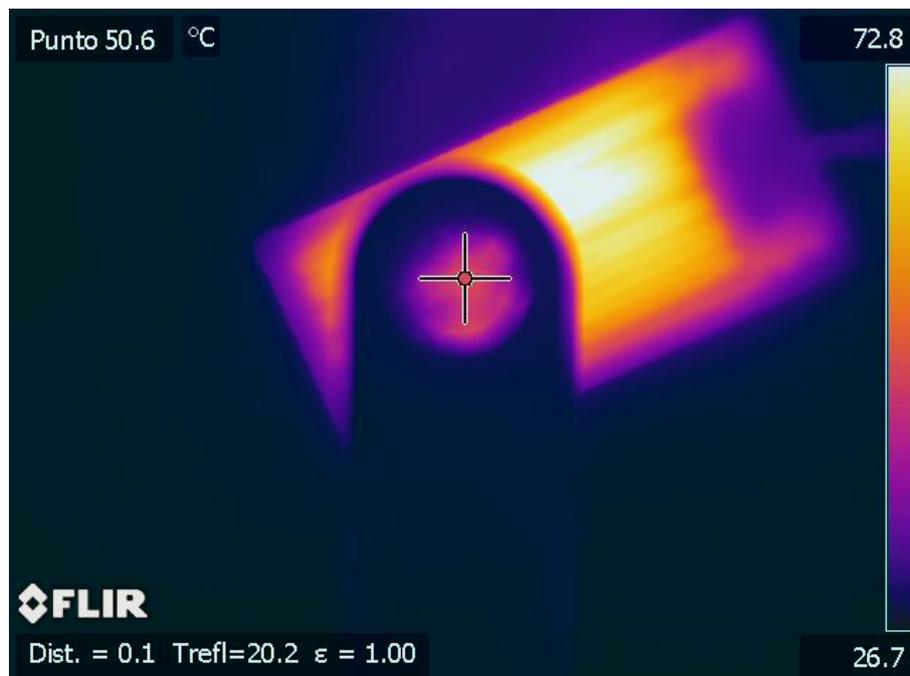
Termografía 106. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl de 16 mm a 70,3 °C.

7. MEDIDAS DE TRANSMISIVIDADES DE UNA LENTE DE NACL RECUBIERTA CON DIVERSOS ESPESORES DE PARAFILM.

LENTE DE NACL DE 4 mm CON PARAFILM DE 0,44 mm:

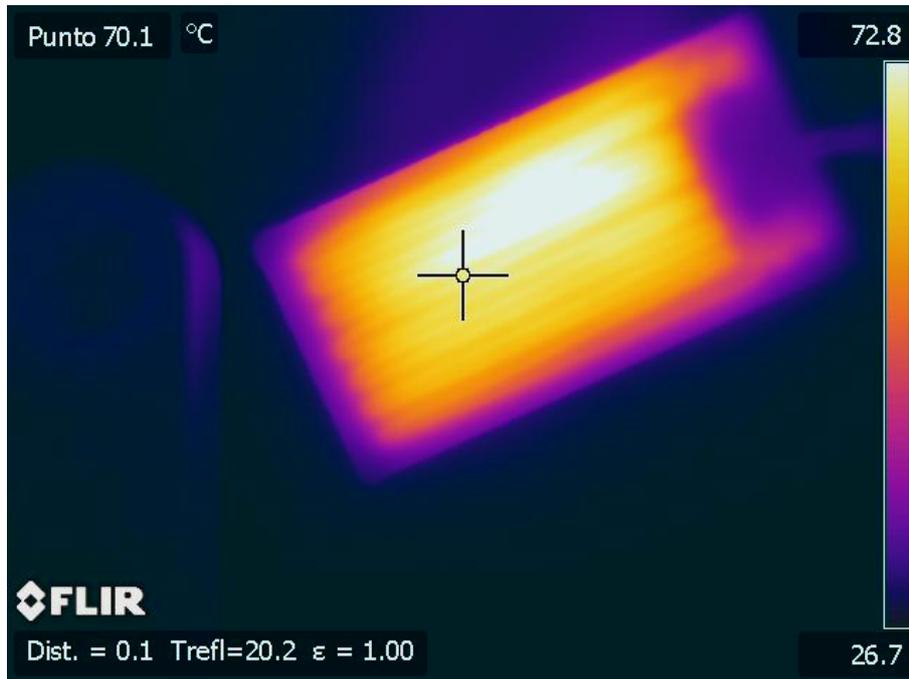


Termografía 107. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,1 °C.



Termografía 108. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl recubierto con 0,44 mm de Parafilm, a 70,1 °C.

LENTE DE NACl DE 4 mm CON PARAFILM DE 0,66 mm:

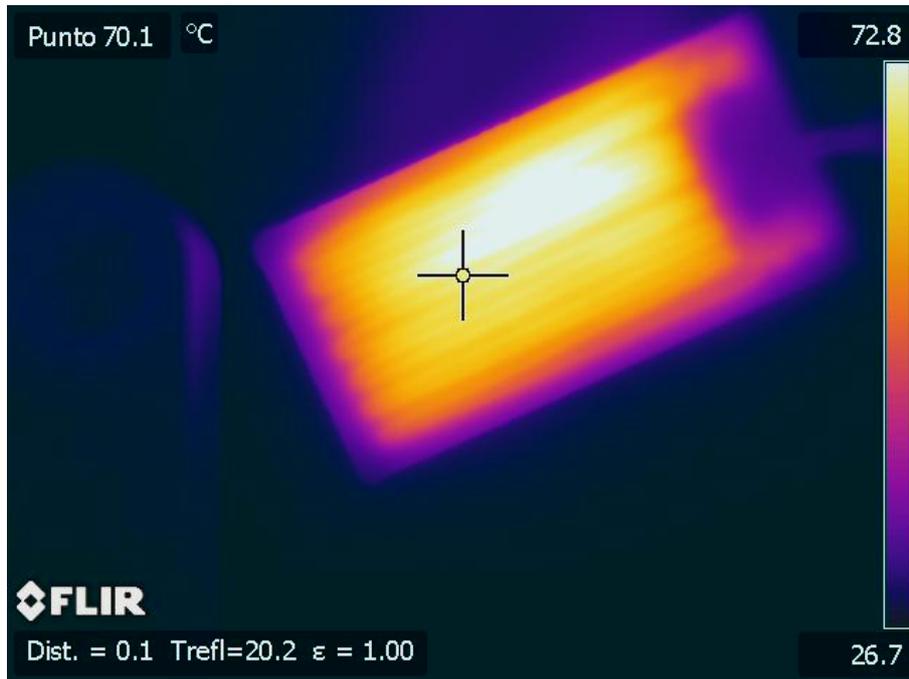


Termografía 109. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,1 °C.

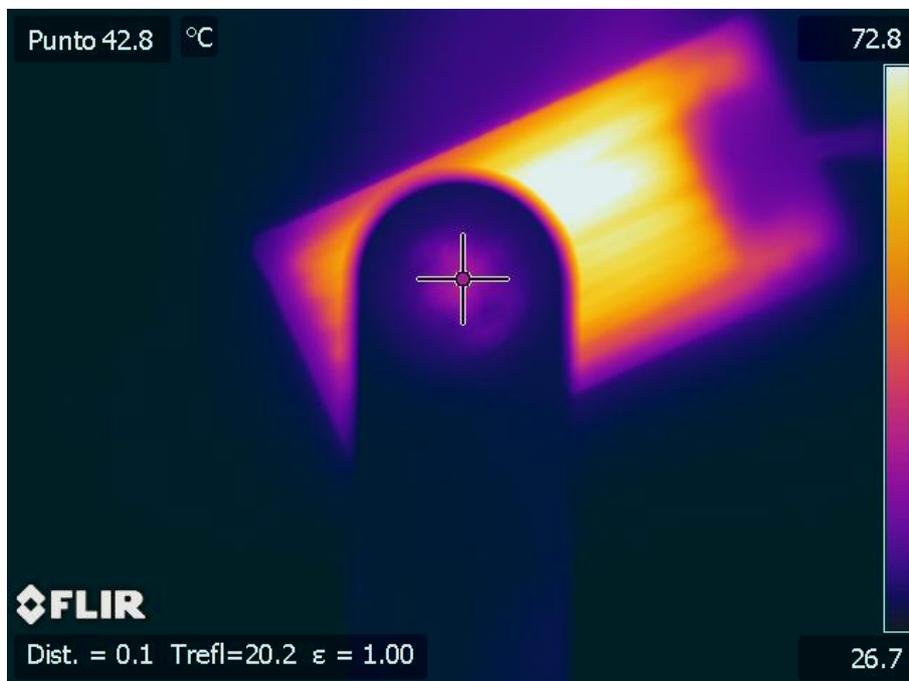


Termografía 110. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl recubierto con 0,66 mm de Parafilm, a 70,1 °C.

LENTE DE NACL DE 4 mm CON PARAFILM DE 0,88 mm:

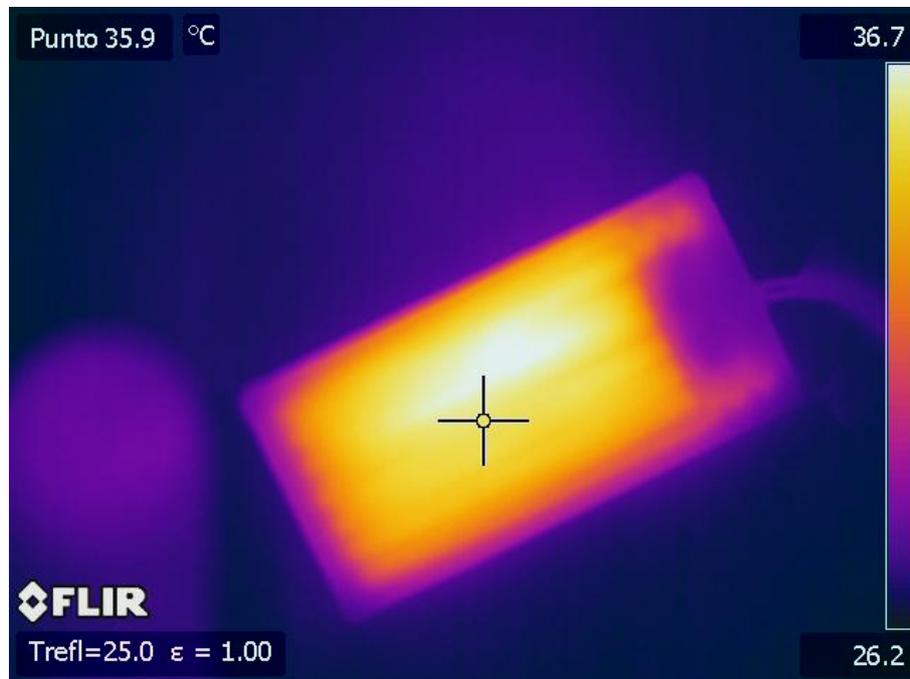


Termografía 111. Medida de la temperatura de la resistencia a 70,1 °C.

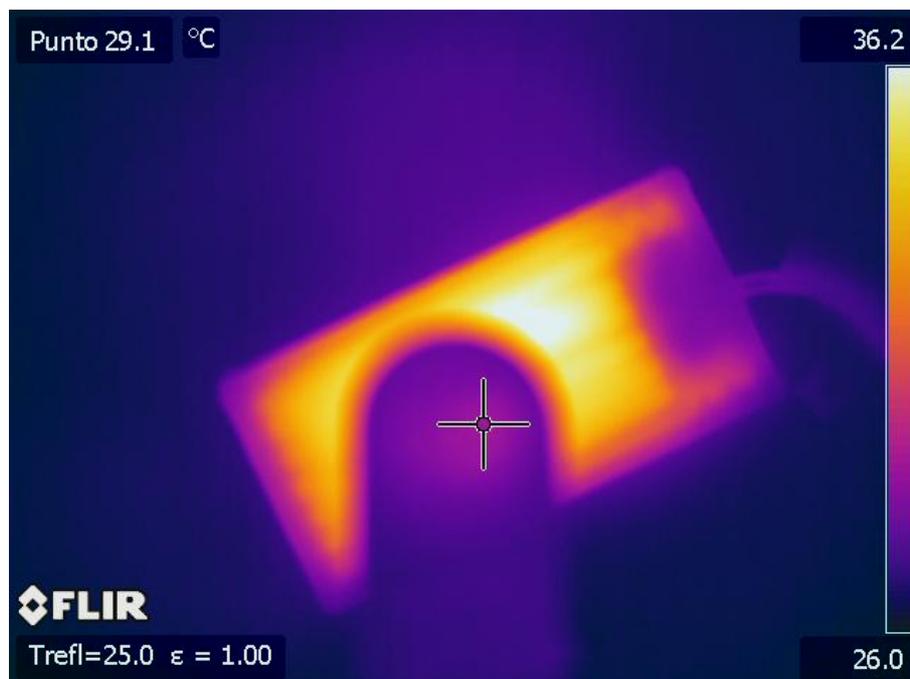


Termografía 112. Medida de la transmisividad del cristal de NaCl recubierto con 0,88 mm de Parafilm, a 70,1 °C.

8. MEDIDA DE LA TRANSMISIVIDAD DE LA SIMULACIÓN DEL DISEÑO DE LA VENTANA INFRARROJA.

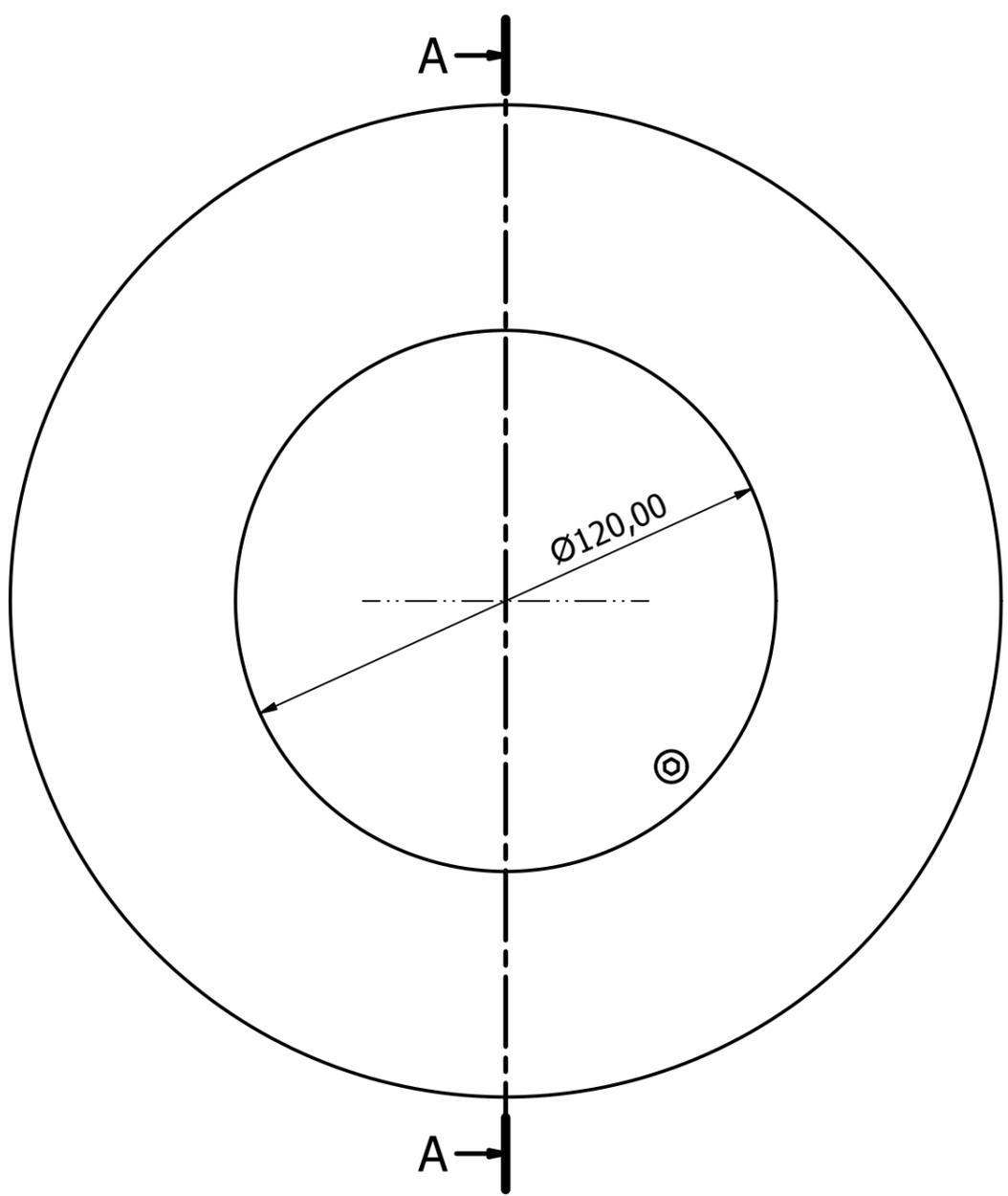


Termografía 113. Medida de la temperatura de la resistencia a 35,9 °C.

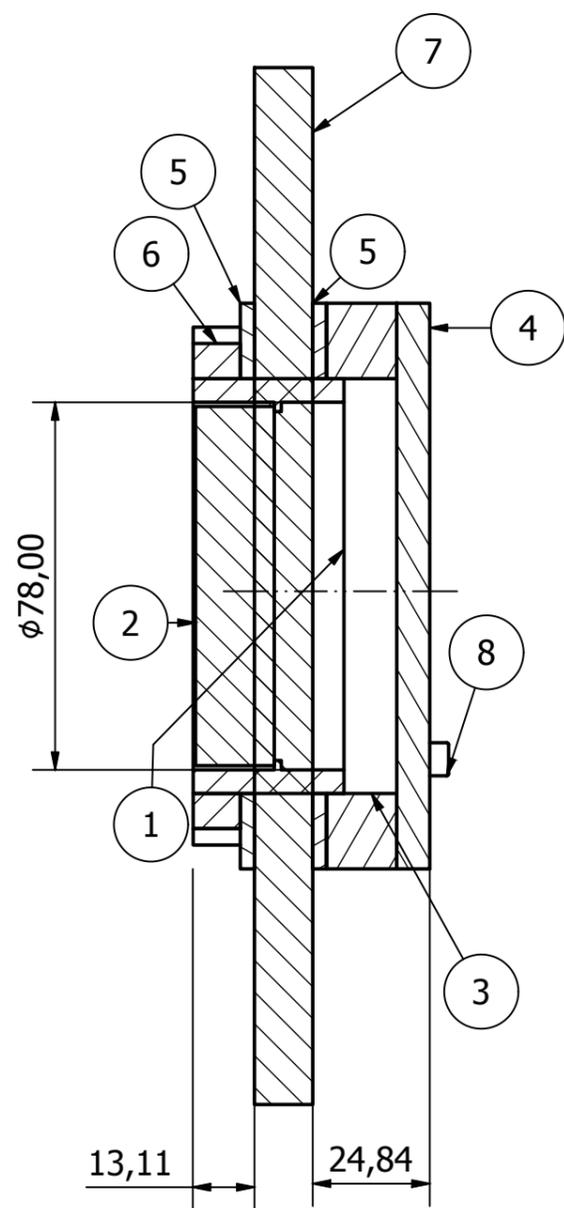


Termografía 114. Medida de la transmisividad del sistema que simula el comportamiento del diseño de la ventana infrarroja, a 35,9 °C.

ANEXO DE PLANOS



A-A (1 : 1,5)



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Base roscada del crystal	
2	1	Crystal termográfico	
3	1	Anillo sellador	
4	1	Tapa abatible	
5	2	Junta silicona	
6	1	Anillo roscado	
7	1	Pantalla del cuadro	
8	2	AS 1420 - 1973 - M4 x 8	Tornillos métricos ISO con cabeza cilíndrica con huevo hexagonal

DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

La finalidad de este documento es mostrar los costes derivados tanto de la ventana infrarroja como de su instalación, de manera que permita un posible análisis de mercado y comparación con métodos de inspección de cuadros eléctricos tradicionales.

En primer lugar, se muestran los presupuestos parciales correspondientes a la mano de obra, equipos y materiales utilizados para la instalación de la ventana y su uso para la inspección de equipos eléctricos, siempre de acuerdo a la normativa NFPA 70E:

Tabla 23. Presupuesto por capítulos de la mano de obra y equipos empleados para instalar la ventana y realizar la inspección a través de la misma.

CÓDIGO	RESUMEN	UNIDAD	CANTIDAD (h)	PRECIO UNITARIO (€/h)	IMPORTE (€)
01.	Preparación del equipo				
01.01	Peón electricidad	h	0,2	14,71	2,94
01.02	Oficial 1ª electricidad	h	0,2	18,49	3,70
01.03	Gafa protectora	ud	2	13,19	26,38
01.04	Casco aislante eléctrico 440V	ud	2	12,35	24,70
01.05	Guantes dieléctricos para alta tensión	ud	2	51,43	102,86
01.06	Bota dieléctrica	ud	4	19,98	79,92
01.07	Flash suit SEGÚN NFPA70	ud	2	300	600,00
01.08	Costes indirectos	%	840,5	3	25,22
02.	Instalación de la ventana				
02.01	Peón electricidad	h	0,5	14,71	7,36
02.02	Oficial 1ª electricidad	h	0,5	18,49	9,25
02.03	Costes indirectos	%	16,6	3	0,50
03.	Inspección con cámara infrarroja				
03.01	Ingeniero técnico	h	0,05	24,11	1,21
03.02	Casco aislante eléctrico 440V	ud	1	12,35	12,35
03.03	Guantes dieléctricos para media tensión	ud	1	42,85	42,85
03.04	Bota dieléctrica	ud	2	19,98	39,96
03.05	Costes indirectos	%	96,3655	3	2,89
				TOTAL (€)	982,07

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

Tabla 24. Presupuesto por capítulos los materiales empleados en la fabricación e instalación de la ventana infrarroja.

CÓDIGO	RESUMEN	UNIDAD	CANTIDAD (u)	PRECIO UNITARIO (€/u)	IMPORTE (€)
01.	Componentes de la ventana infrarroja				
01.01	Cristal de NaCl (1 pulgada de diámetro y 4 mm de espesor)	ud	1	105	105,00
01.02	Recubrimiento de Parafilm (4 x 125 ft)	m	0,01	36,99	0,37
01.03	Adhesivo de contacto para unión a pantalla	kg	0,2	5,37	1,07
01.04	junta de silicona	kg	0,2	20,75	4,15
01.05	Base roscada M88 x 3 de polipropileno	kg	1	1,78	1,78
01.06	Anillo de tuerca roscada M88 x 3 de polipropileno	kg	0,7	1,78	1,25
01.07	Tapa abatible de polipropileno	kg	0,3	1,78	0,53
01.08	Anillo roscado M88 x 3 de cierre	kg	0,7	1,78	1,25
01.09	Tuerca roscada hexagonal M4 x 8 de acero AISI 304	ud	1	0,16	0,16
01.10	Costes indirectos	%	115,56	3	3,47
				TOTAL (€)	119,03

Por último, se muestra el resumen del presupuesto, correspondiente a la instalación e inspección a través de la ventana infrarroja, teniendo en cuenta los anteriores presupuestos parciales. El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) se calcula a partir del presupuesto total por capítulos (material y mano de obra). A continuación, se suman los porcentajes correspondientes a los Gastos Generales (13%) y al Beneficio Industrial (6%), dando como resultado el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC). Por último, se obtiene el Presupuesto Base Licitación, que constituye el presupuesto total de la inspección, sumando el porcentaje del IVA (21%) al valor del PEC.

Diseño y caracterización de una nueva ventana infrarroja para la inspección de elementos potencialmente peligrosos.

Tabla 25. Resumen del presupuesto correspondiente a la instalación del prototipo de ventana infrarroja, junto a la actividad de inspección de equipo eléctrico a su través por medio de termografías.

DESCRIPCIÓN	IMPORTE (€)
PRESUPUESTO PARCIAL MANO DE OBRA Y EQUIPOS	982,07
PRESUPUESTO PARCIAL DE MATERIALES	119,03
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	1101,10
+ BENEFICIO INDUSTRIAL (BI)	66,07
+ GASTOS GENERALES (GG)	143,14
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)	1310,30
+ IMPUESTO SOBRE EL VALOR AÑADIDO (IVA)	275,16
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	1585,47

El presupuesto base de licitación, es decir, el presupuesto total del proyecto, asciende a mil quinientos ochenta y cinco euros con cuarenta y siete céntimos.