

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

REVESTIMIENTOS DE FACHADAS DE EDIFICIOS ACTIVOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Alumno/Alumna

Saiz, del Pozo, Lucía

Director/Directora

del Portillo, Valdés, Luis

Departamento

Máquinas y motores térmicos

Curso académico

2018/2019

Bilbao, 10, junio, 2019

Resumen

El sector de la edificación es actualmente uno de los principales consumidores de energía térmica a nivel mundial para el abastecimiento de ACS y para garantizar el confort térmico mediante sistemas de climatización. Es por ello por lo que, en un mundo en el que la transición energética hacia las fuentes renovables es una necesidad, este sector debe suponer una de las áreas de mayor énfasis en la búsqueda de soluciones que permitan reducir las emisiones contaminantes. En este contexto, surge la idea de crear fachadas solares térmicas que sean capaces de generar el calor necesario en los edificios. Esta idea supondría un aumento de la superficie útil disponible para el aprovechamiento solar que además estaría localizada en los principales focos de consumo. En este trabajo, se van a modelizar diferentes geometrías de captadores que se podrían diseñar, para después comparar sus rendimientos y la influencia que la variación de diferentes parámetros tendría sobre el mismo. Esto se logrará mediante la realización de un estudio paramétrico en el que mediante la variación de condiciones ambientales y distintos aspectos de la geometría, se comprobará la idoneidad de cada tipo de colector y condiciones de diseño óptimas en cada circunstancia. Los modelos se formularán teniendo en cuenta los principios básicos de transmisión de calor por conducción, convección y radiación de un modo genérico en un primer momento, adaptando a continuación las ecuaciones necesarias para una mejor correspondencia con la tecnología que se estudia.

Palabras clave: fachada solar térmica, colector solar térmico, optimización, rendimiento.

Laburpena

Gaur egun mundu osoan UBOn hornikuntzarako eta, klimatizazio sistemak erabiliz, erosotasun termikoa ziurtatzeko energia termikoko hartzailerik nagusienetariko bat eraikuntzaren sektorea da. Horregatik, nahitanahiez energia berriztagarrierantz igarotzen dabilen mundu batean, sektore honek indartu behar ditu igortze kutsakorrek murriztuko dituzten konponbideak. Ingurugiro honetan, eraikinenetan behar beste bero eragiteko gauza diren eguzkizko fatxada termikoak sortzearen ideia ageri da. Ideia honek eguzkiko energia aprobetxatzeko erabilgarri den azaleraren handitzea suposatuko luke; gainera, gehien kontsumitzen den tokietan kokatuta egongo litzateke. Lan honetan, kaptadoreen geometria desberdinak diseinatzeko ereduak egingo dira, haien etekina erkatzeko eta parametro batzuk aldatzean egon ahal diren aldaketak aztertzeko. Hau, ikastaro parametrikoko baten bidez lortuko da, inguruneko kondizioak eta geometriaren parametro ezberdinak aldakuntzaren bidez, kolektore bakoitzaren egokitasuna eta diseinu optimoa frogatuko denen. Ereduak, bero transmisioaren mekanismo oinarritzakoak kontuan hartzen formulatuko dira. Lehenik modu generikoan, eta gero ekuazio beharrezkoak moldatzen, teknologiarekin elkarrekotasun hobea edukitzeko.

Hitz nagusiak: eguzkizko fatxada termikoa, eguzki biltzaile termikoa, optimizazioa, etekina.

Abstract

The building sector is nowadays one of the main energy consumers all over the world, both for hot water and in order to guarantee thermal comfort by means of climatization systems. Due to this, in a world where energy transition towards renewable sources is an actual need, this sector must be one of the main focus areas in the search of solutions which allow the reduction of polluting emissions. In this context raises the idea of building solar thermal facades capable of generating the necessary heat in buildings. This idea would mean a rise on the available useful surface for solar exploitation with the added advantage of generating energy nearby the main consumption areas. On this paper, various collector geometries possible for design will be modeled so yields can be first obtained and then compared not only among the different technologies, but also the influence that certain parameters can have. This will be achieved by developing a parametric study on which ambient conditions and several aspects of the geometry will be varied, checking afterwards, the suitability of each type of collector and optimal design conditions on each circumstance. The models will be formulated taking into account the basic principles of heat transmission via conduction, convection and radiation, first on a generic way and then adapting the necessary equation to suit better the studying technology.

Key words: solar thermal façade, solar thermal collector, optimization, yield.



Contenido

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen..... | i |
| Laburpena..... | i |
| Abstract | ii |
| Glosario de términos | ix |
| 1 Memoria | 1 |
| 1.1 Introducción | 1 |
| 1.2 Contexto | 2 |
| 1.2.1 La energía solar..... | 2 |
| 1.2.2 Sector de la edificación en Europa | 6 |
| 1.2.3 Trabajos previos en la UPV cooperación educativa con Tecnalía | 7 |
| 1.3 Objetivos y alcance..... | 8 |
| 1.3.1 Objetivos..... | 8 |
| 1.3.2 Alcance | 9 |
| 1.4 Beneficios que aporta el trabajo | 11 |
| 1.5 Análisis del estado del arte..... | 12 |
| 1.5.1 Colectores solares térmicos no acristalados | 13 |
| 1.5.2 Otras tecnologías..... | 14 |
| 1.5.3 Sistemas para el uso de colectores no acristalados | 17 |
| 1.5.4 El problema de la integración..... | 20 |
| 1.5.5 Guías de integración..... | 22 |
| 1.5.6 Tipos de cerramientos fachada ventilada | 23 |
| 1.5.7 Materiales..... | 24 |
| 1.5.8 Investigaciones destacables | 26 |
| 1.6 Análisis de alternativas..... | 32 |
| 1.6.1 Colector solar no acristalado..... | 33 |
| 1.6.2 Colector solar no acristalado con revestimiento..... | 33 |
| 1.6.3 Colector solar acristalado | 34 |

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1.6.4 | Colector continuo no acristalado | 34 |
| 1.6.5 | Colector continuo revestido..... | 35 |
| 1.6.6 | Colector continuo acristalado (SAVOSOLAR®) | 35 |
| 1.7 | Análisis de riesgos | 36 |
| 1.7.1 | Trabajo de fin de Máster | 36 |
| 1.7.2 | Desarrollo experimental..... | 37 |
| 1.7.3 | Matriz de riesgos | 39 |
| 1.8 | Selección y descripción de la solución propuesta | 39 |
| 2 | Metodología seguida..... | 41 |
| 2.1 | Descripción de tareas, fases, equipos y procedimientos | 41 |
| 2.1.1 | Elaboración del estado del arte..... | 41 |
| 2.1.2 | Programación de modelos | 42 |
| 2.1.3 | Redacción del TFM | 45 |
| 2.2 | Diagrama de Gantt | 46 |
| 2.3 | Cálculos..... | 47 |
| 2.3.1 | Colector solar térmico no acristalado | 47 |
| 2.3.2 | Colector solar no acristalado con revestimiento..... | 54 |
| 2.3.3 | Colector solar acristalado..... | 55 |
| 2.3.4 | Colector solar continuo no acristalado | 57 |
| 2.3.5 | Colector solar continuo no acristalado con revestimiento | 58 |
| 2.3.6 | Colector continuo acristalado | 58 |
| 2.3.7 | Validación mediante el caso Batisol..... | 59 |
| 2.4 | Descripción de los resultados..... | 61 |
| 2.4.1 | Resultados del barrido paramétrico..... | 61 |
| 2.4.2 | Configuración óptima de cada geometría | 68 |
| 2.4.3 | Posicionamiento de las distintas geometrías | 70 |
| 2.5 | Plan de proyecto y planificación | 73 |
| 3 | Aspectos económicos..... | 76 |
| 3.1 | Descripción del presupuesto | 76 |

| | |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| | v |
| 3.1.1 Trabajo de fin de máster | 76 |
| 3.1.2 Desarrollo experimental..... | 77 |
| 3.2 Análisis de rentabilidad | 81 |
| 4 Conclusiones..... | 85 |
| 5 Bibliografía..... | 87 |
| Anexo I: normativa aplicable | 92 |
| Anexo II: gráficas | 93 |
| Colector solar revestido | 93 |
| Colector solar acristalado..... | 95 |
| Colector solar continuo no acristalado | 97 |
| Colector solar continuo revestido | 100 |
| Colector solar continuo acristalado | 103 |
| Comparación de distintas tecnologías | 107 |
| Anexo III: Código..... | 108 |
| Entrada de datos | 108 |
| Aplicación 1 ^{er} Principio de la termodinámica | 110 |
| Evolución en los nodos..... | 111 |
| Gráficas..... | 111 |
| Barrido datos ambientales | 114 |
| Barrido datos geométricos | 127 |

Lista de ilustraciones

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1 Termosifón de Bailey (5)..... | 3 |
| Ilustración 2 Mapa del potencial solar de Europa (9) | 4 |
| Ilustración 3 Potencial e Inversión en energía solar en Europa (11)..... | 5 |
| Ilustración 4 WBS del proyecto | 10 |
| Ilustración 5 Esquema de un colector solar no acristalado (19) | 13 |
| Ilustración 6 Eficiencia colectores en varias categorías (20)..... | 13 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 7 Esquema funcionamiento colectores transpirables (22)..... | 14 |
| Ilustración 8 Aplicación colectores SolarWall (22) | 15 |
| Ilustración 9 Colector solar acristalado de placa plana (26) | 16 |
| Ilustración 10 Esquema de los tubos de vacío (27) | 17 |
| Ilustración 11 Esquema de colector parabólico (28)..... | 17 |
| Ilustración 12 Esquema funcionamiento precalentador solar (29)..... | 18 |
| Ilustración 13 Instalación calefacción baja temperatura (31)..... | 18 |
| Ilustración 14 Esquema instalación bomba de calor (33) | 19 |
| Ilustración 15 COP vs. Temperatura del primario (35)..... | 19 |
| Ilustración 16 Esquema de una instalación de DC (36) | 20 |
| Ilustración 17 Rangos de temperaturas del agua en DC (37)..... | 20 |
| Ilustración 18 Resultados de la encuesta realizada en (17) | 21 |
| Ilustración 19 Paneles casete (41)..... | 23 |
| Ilustración 20 Ejemplo de paneles de fachada (42) | 24 |
| Ilustración 21 Panel sándwich (44)..... | 24 |
| Ilustración 22 Fachada ventilada en gres porcelánico (46)..... | 25 |
| Ilustración 23 Fachada ventilada en piedra (47) | 25 |
| Ilustración 24 Revestimiento en panel fenólico (49) | 26 |
| Ilustración 25 Revestimiento aluminio composite (50) | 26 |
| Ilustración 26 Aplicación de colectores SOLABS (52) | 27 |
| Ilustración 27 Colectores de LA TOITURE SOLAIRE (53) | 28 |
| Ilustración 28 Estructura de panel BATISOL (55)..... | 29 |
| Ilustración 29 Despiece de un colector BASSE (58)..... | 31 |
| Ilustración 30 Barandilla termodinámica del proyecto RhOME (35) | 32 |
| Ilustración 31 Esquema colector solar no acristalado..... | 33 |
| Ilustración 32 Esquema del colector solar no acristalado con revestimiento estético..... | 33 |
| Ilustración 33 Esquema de colector solar acristalado..... | 34 |
| Ilustración 34 Colector continuo no acristalado | 34 |
| Ilustración 35 Colector solar continuo revestido | 35 |



| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| | vii |
| Ilustración 36 Colector solar continuo acristalado..... | 35 |
| Ilustración 37 Diagrama de Gantt del TFM | 46 |
| Ilustración 38 Secciones aplicadas al colector | 47 |
| Ilustración 39 Sección 4 como aleta | 48 |
| Ilustración 40 Esquema de resistividades térmicas | 50 |
| Ilustración 41 Secciones aplicadas al colector caso 2 | 54 |
| Ilustración 42 Esquema eléctrico equivalente caso 2 | 54 |
| Ilustración 43 Secciones aplicadas al colector caso 3 | 55 |
| Ilustración 44 Esquema de calores en el colector | 57 |
| Ilustración 45 Esquema eléctrico equivalente caso 4 | 58 |
| Ilustración 46 Esquema eléctrico equivalente del caso 5 | 58 |
| Ilustración 47 Esquema simplificado de instalación experimental | 74 |
| Ilustración 48 Diagrama de Gantt del desarrollo experimental..... | 75 |

Lista de Tablas

| | |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Características del colector Energie Solaire (53) | 28 |
| Tabla 2 Análisis DAFO del TFM | 36 |
| Tabla 3 Análisis DAFO del desarrollo experimental | 37 |
| Tabla 4 Matriz de riesgos | 39 |
| Tabla 5 Resumen fase elaboración estado del arte | 41 |
| Tabla 6 Resumen fase programación de modelos | 42 |
| Tabla 7 Parámetros fijados para el ensayo | 53 |
| Tabla 8 Parámetros de sensibilidad | 53 |
| Tabla 9 Parámetros de sensibilidad de la placa | 54 |
| Tabla 10 Parámetros del caso 2 | 55 |
| Tabla 11 Parámetros específicos del caso 3..... | 56 |
| Tabla 12 Parámetros del modelo Batisol | 59 |
| Tabla 13 Correlaciones para un modelo 2D (58)..... | 60 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 14 Correlaciones para un modelo pseudo 3D (58) | 60 |
| Tabla 15 Coeficientes de ecuación característica colector no acristalado..... | 61 |
| Tabla 16 Parámetros geometría base | 61 |
| Tabla 17 Coeficientes de la ecuación característica del colector acristalado | 66 |
| Tabla 18 Resumen de variaciones de rendimiento según parámetros..... | 68 |
| Tabla 19 Variación de rendimiento según la resistividad de placa | 68 |
| Tabla 20 Condiciones ambientales..... | 70 |
| Tabla 21 Resumen presupuesto TFM | 76 |
| Tabla 22 Presupuesto instalación para desarrollo experimental..... | 79 |
| Tabla 23 Valores de payback para cada instalación..... | 82 |

Lista de gráficas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 1 Evolución de subsectores en la construcción (13)..... | 6 |
| Gráfica 2 Fuentes de energía para calefacción en edificación (16)..... | 11 |
| Gráfica 3 Comprobación del modelo Batisol..... | 60 |
| Gráfica 4 Recta de operación del colector no acristalado..... | 61 |
| Gráfica 5 Rendimiento vs diferencia de temperatura para varias irradiancias..... | 62 |
| Gráfica 6 Variación del rendimiento y la temperatura con la longitud..... | 63 |
| Gráfica 7 Ancho vs. Rendimiento según caudal y aislamiento colector no acristalado | 64 |
| Gráfica 8 Rendimiento según ancho vs caudal..... | 65 |
| Gráfica 9 Rendimiento para ancho vs resistividad de placa..... | 65 |
| Gráfica 10 Recta de operación del colector acristalado..... | 66 |
| Gráfica 11 Ancho vs. Rendimiento según caudal y aislamiento colector acristalado | 67 |
| Gráfica 12 Relación entre el caudal y el rendimiento | 69 |
| Gráfica 13 Posicionamiento de las distintas geometrías | 70 |
| Gráfica 14 Intervalos de rendimiento según tecnología y diferencia de temperatura..... | 71 |
| Gráfica 15 Rectas de operación de todos los colectores | 72 |
| Gráfica 16 Rectas de rendimiento de los colectores no acristalados | 73 |
| Gráfica 17 Distribución de costes horas internas..... | 77 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| | ix |
| Gráfica 18 Comparación de precios de distintas instalaciones (14)..... | 81 |
| Gráfica 19 Costes de explotación de instalaciones energéticas €/año (14)..... | 81 |
| Gráfica 20 NVP €/año | 82 |
| Gráfica 21 Comparativa de inversiones para distintos modos de generación..... | 83 |

Lista de acrónimos

| | |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| ACS | Agua Caliente Sanitaria |
| DH | District Heating |
| EPBD | Energy Performance of Buildings Directive |
| FIEC | Federación Industrial Europea de la Construcción |
| FSTA | Fachadas Solares Térmicas Activas |
| IDAE | Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía |
| IDE | Integrated Development Enviroment |
| MPE | multiport extrusions |
| NPV | Net Present Value |
| NREP | National Renewable Energy Plans |
| nZEB | Nearly Zero-Energy Building |
| ROI | Return On Investment |
| UE | Unión Europea |
| WBS | Work Breakdown Structure |

Glosario de términos

| | | |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------|
| A | Área del elemento de estudio | [m ²] |
| a | Anchura del colector | [m] |
| A_c | Área del colector | [m ²] |
| c_{agua} | Velocidad del agua en la tubería | [m/s] |
| c_e | Calor específico del agua | [J/kg·K] |
| c_{gas} | Calor específico del gas | [J/kg·K] |

| | | |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| dx | Elemento diferencial de colector | [m] |
| $\frac{dE}{dt}$ | Variación de potencia | [W] |
| d_h | Diámetro hidráulico | [m] |
| d_{in} | Diámetro interior de la tubería | [m] |
| d_{out} | Diámetro exterior de la tubería | [m] |
| e_{ais} | Espesor del aislante | [m] |
| e_{cav} | Espesor cámara de aire | [m] |
| e_{cris} | Espesor del cristal | [m] |
| e_p | Espesor de la placa | [m] |
| e_{rev} | Espesor del revestimiento | [m] |
| e_{sol} | Espesor de la soldadura | [m] |
| Gr_{gas} | Número de Grashof cámara gas | |
| h_{agua} | Coefficiente de convección del agua | [W/m ² ·K] |
| h_{ext} | Coefficiente de convección en la superficie | [W/m ² ·K] |
| h_g | Conductancia de calor del gas | [W/m ² ·K] |
| h_i | Conductancia de calor interna del acristalamiento | [W/m ² ·K] |
| h_r | Conductancia por radiación | [W/m ² ·K] |
| h_s | Conductancia térmica en la cámara de gas | [W/m ² ·K] |
| h_t | Conductancia térmica total del acristalamiento | [W/m ² ·K] |
| h_{tras} | Coefficiente de convección en el trasdós | [W/m ² ·K] |
| I | Radiación solar global | [W/m ²] |
| k_{ais} | Conductividad del aislante | [W/m·K] |
| k_{cris} | Conductividad del cristal | [W/m·K] |
| k_p | Conductividad de la placa | [W/m·K] |
| k_{sol} | Conductividad de la soldadura | [W/m·K] |
| k_{rev} | Conductividad del revestimiento | [W/m·K] |
| k_{tub} | Conductividad de la tubería | [W/m·K] |
| L | Longitud total del colector | [m] |

| | | |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------|
| l | Longitud de nodo del colector | [m] |
| m_{agua} | Caudal másico de agua | [kg/s] |
| Nu | Número de Nussel | |
| Nu_{gas} | Número de Nussel cámara de gas | Nu |
| Pr | Número de Prandtl | |
| Pr_{gas} | Número de Prandtl cámara de gas | |
| \dot{Q} | Potencia calorífica | [W] |
| \dot{Q}_1 | Potencia calorífica sección 1 | [W] |
| \dot{Q}_{1-3} | Potencia calorífica de sección 1 a 3 | [W] |
| \dot{Q}_2 | Potencia calorífica sección 2 | [W] |
| \dot{Q}_{2-1} | Potencia calorífica de sección 2 a 31 | [W] |
| \dot{Q}_{2-3} | Potencia calorífica de sección 2 a 3 | [W] |
| \dot{Q}_{2-4} | Potencia calorífica de sección 2 a 4 | [W] |
| \dot{Q}_3 | Potencia calorífica sección 3 | [W] |
| \dot{Q}_{3-4} | Potencia calorífica de sección 3 a 4 | [W] |
| $\dot{Q}_{3-\text{agua}}$ | Potencia calorífica de sección 3 a agua | [W] |
| \dot{Q}_4 | Potencia calorífica sección 4 | [W] |
| $\dot{Q}_{4-\text{agua}}$ | Potencia calorífica de sección 4 a agua | [W] |
| \dot{Q}_{agua} | Potencia calorífica aportada al agua | [W] |
| \dot{q}_{agua} | Potencia calorífica aportada al agua por nodo | [W] |
| $\dot{q}_{\text{agua tot}}$ | Potencia calorífica aportada al agua total | [W] |
| $\dot{Q}_{\text{cond } x}$ | Potencia calorífica de conducción en x | [W] |
| $\dot{Q}_{\text{cond } x+\Delta x}$ | Potencia calorífica de conducción en $x+\Delta x$ | [W] |
| \dot{Q}_L | Pérdidas de potencia del colector | [W] |
| $\dot{Q}_{\text{perdidas}}$ | Potencia calorífica evacuada por pérdidas | [W] |
| \dot{Q}_S | Potencia calorífica almacenada en el colector | [W] |
| \dot{Q}_{SOL} | Potencia calorífica absorbida del sol | [W] |
| \dot{Q}_{SOL1} | Potencia calorífica absorbida del sol en 1 | [W] |

| | | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| \dot{Q}_{SOL2} | Potencia calorífica absorbida del sol en 2 | [W] |
| \dot{Q}_{tras} | Potencia calorífica por el trasdós | [W] |
| \dot{Q}_{tras2} | Potencia calorífica por el trasdós en 2 | [W] |
| \dot{Q}_{tras4} | Potencia calorífica por el trasdós en 4 | [W] |
| \dot{Q}_U | Potencia calorífica útil | [W] |
| R_1 | Resistividad eléctrica equivalente placa exterior | [m ² ·K/W] |
| R_{1-3} | Resistencia eléctrica equivalente entre secciones 1 y 3 | [m ² ·K/W] |
| R_2 | Resistividad eléctrica equivalente total acristalamiento | [m ² ·K/W] |
| R_3 | Resistividad eléctrica equivalente interior del acristalamiento | [m ² ·K/W] |
| R_4 | Resistencia eléctrica equivalente en la sección 4 | [m ² ·K/W] |
| R_{agua} | Resistividad convección del agua | [m ² ·K/W] |
| R_{ais} | Resistividad eléctrica equivalente aislante | [m ² ·K/W] |
| R_{placa} | Resistividad eléctrica equivalente de la placa | [m ² ·K/W] |
| R_{rev} | Resistividad eléctrica equivalente del revestimiento | [m ² ·K/W] |
| R_{tras} | Resistividad eléctrica equivalente trasdós | [m ² ·K/W] |
| Re | Número de Reynolds | |
| r_{in} | Radio interior tubería | [m] |
| r_m | Radio medio | [m] |
| r_{out} | Radio exterior de la tubería | [m] |
| T_a | Temperatura del ambiente | [K] |
| T_{agua} | Temperatura media del agua | [K] |
| $T_{agua in}$ | Temperatura de entrada del agua | [K] |
| $T_{agua out}$ | Temperatura de salida del agua | [K] |
| T_{mair} | Temperatura media del aire | [K] |
| T_p | Temperatura de placa | [K] |
| T_T | Temperatura de la tubería | [K] |
| T_{tras} | Temperatura del trasdós | [K] |
| U_b | Coficiente de pérdidas por el trasdós | [W/m ² ·K] |

| | | |
|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------|
| U_L | Coeficiente de pérdidas global del colector | $[W/m^2 \cdot K]$ |
| U_T | Coeficiente de pérdidas exterior | $[W/m^2 \cdot K]$ |
| v | Velocidad del viento | $[m/s]$ |
| v_{agua} | Caudal de agua | $[m^3/s]$ |
| W | Potencia | $[W]$ |
| ΔT | Diferencia de temperatura en el agua | $[K]$ |
| ΔT_{gas} | Diferencia de temperatura en la cámara de gas | $[K]$ |
| α | Absortividad | |
| ϵ | Emisividad | |
| ϵ_1 | Emisividad cristal | |
| ϵ_2 | Emisividad de la placa | |
| σ | Constante de Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$) | $[W/m^2 \cdot K]$ |
| ρ | Densidad del agua | $[kg/m^3]$ |
| ρ_{gas} | Densidad del gas | $[kg/m^3]$ |
| μ | Viscosidad dinámica del agua | $[kg/m \cdot s]$ |
| μ_{gas} | Viscosidad dinámica del gas | $[kg/m \cdot s]$ |
| η_{global} | Rendimiento global del colector | |
| η_{nodo} | Rendimiento por nodo | |
| λ_{gas} | conductividad térmica del gas | $[W/m \cdot K]$ |

1 Memoria

1.1 Introducción

Los edificios suponen más de un tercio del consumo de energía final en el mundo y de ella, aproximadamente la mitad corresponde a energía térmica. Como consecuencia, también son la causa de alrededor de un tercio de las emisiones de CO₂ (1). Sin embargo, actualmente existen tecnologías que permitirían reducir la huella de carbono de los edificios al integrar el uso de energía solar en la fachada de los mismos, sustituyendo a los combustibles fósiles que se utilizan actualmente para la generación de agua caliente sanitaria (ACS) y generación de frío y calor, esto son las fachadas solares térmicas activas (FSTA).

La mayoría de los esfuerzos en la mejora de la eficiencia energética que han tenido lugar hasta ahora, han ido principalmente dirigidos a aplicaciones industriales, de ahí que en el ámbito de la edificación aún quede un largo camino que recorrer para lograr la sostenibilidad a la que se aspira. En esta línea, las fachadas solares activas que se están desarrollando actualmente podrían jugar un papel crucial en la descarbonización del planeta, si se logra la optimización del aprovechamiento energético de las mismas.

Como se presentará más adelante en el estado del arte, actualmente hay varias investigaciones y prototipos en desarrollo, algunos más consolidados que otros para su aplicación en los edificios. Algunos ejemplos que ya se comercializan en la actualidad son los desarrollados por *Solarwall* o *Energie Solaire* mientras que ejemplos de investigaciones que se están llevando a cabo en la actualidad, son prototipos como el de *Batisol*, *Solabs* o el proyecto *Basse*.

En este trabajo se va a realizar un estudio dirigido a conocer cómo afectan diferentes parámetros geométricos y ambientales al rendimiento de diferentes tecnologías de colectores para sistematizar la búsqueda de aquellas condiciones que supongan un rendimiento máximo.

Para ello se ha estructurado el documento en diferentes secciones que ayuden a lograr una comprensión general del tema además de profundizar en los aspectos más relacionados con el trabajo técnico que se ha realizado.

En el capítulo de la memoria, se introduce la cuestión, situándola en su contexto y haciendo una exposición de los objetivos y alcance de la misma y justificando su interés por medio de los beneficios esperados. A continuación, se presenta el estado del arte como repaso teórico de la situación actual en la que se encuentran las investigaciones sobre colectores solares térmicos, principalmente no acristalados.

El segundo capítulo, servirá como exposición de la metodología seguida. Aquí se describirán las tareas necesarias para el desarrollo del trabajo, se explicarán brevemente los cálculos realizados con un comentario posterior de los resultados obtenidos.

En el tercer capítulo se enfoca el proyecto desde su perspectiva económica mediante el desarrollo de un presupuesto y un análisis de rentabilidad del mismo.

Finalmente se extraen las conclusiones más relevantes del trabajo, que servirán como punto de partida para la optimización en el diseño de colectores así como para nuevas investigaciones.

1.2 Contexto

1.2.1 La energía solar

La energía solar es la que producen la luz o el calor del sol, que puede ser utilizada para la producción de electricidad o energía térmica. Es una fuente renovable y limpia.

La superficie terrestre recibe 120.000 terawatios de irradiación solar, lo que supone aproximadamente 10.000 veces la potencia que necesita el planeta completo (2). Además, se considera que es una fuente de energía infinita ya que a pesar de llevar más de cinco mil millones de años radiando, se calcula que aún no ha llegado al 50% de su vida. (3)

La energía solar es transformada en energía útil, térmica o eléctrica, para su consumo donde sea necesario. Es por lo tanto una fuente capaz de sustituir energías tradicionales como la nuclear o las fósiles.

1.2.1.1 Historia de la energía solar térmica

En el siglo VII a.C. ya se utilizaba el sol para encender hogueras mediante el uso de cristales magnificadores y en el siglo III a.C. los griegos y romanos utilizaban el sol para prender antorchas para las ceremonias religiosas.

Otro uso muy antiguo de la energía solar que aún hoy es popular, eran los solarios, que usan enormes ventanas para dirigir la luz solar a una zona concreta. En la antigua Roma, estas habitaciones eran típicas en la fachada sur de los baños.

Ya en el siglo XVIII, científicos e investigadores tuvieron éxito al utilizar la luz solar para prender hornos en viajes largos y también aprovecharon la energía solar para barcos de vapor. (4)

En 1896 aparece en Estados Unidos el primer calentador de agua solar que consistía básicamente en una caja pintada de negro llena de agua. Una de las grandes desventajas del sistema era que incluso en condiciones óptimas se tardaba un día completo en calentar el agua y durante la noche el calor se perdía rápidamente al no existir ningún tipo de aislante. Cuando el inventor Clarence Kemp solucionó

el problema, el calentamiento solar del agua se transformó en una opción comercial viable por primera vez.

En 1909, William Bailey creó un diseño más compacto y ergonómico de manera que se convirtió en el líder comercial de la energía termo-solar. Baley inventó en primer termosifón que situaba el tanque en el tejado con un colector debajo de forma que el agua caliente podía ser utilizada tanto de día como de noche. Esto supuso que para 1930, el calentamiento solar de agua fuera un sistema ampliamente extendido por Florida y California. (5)

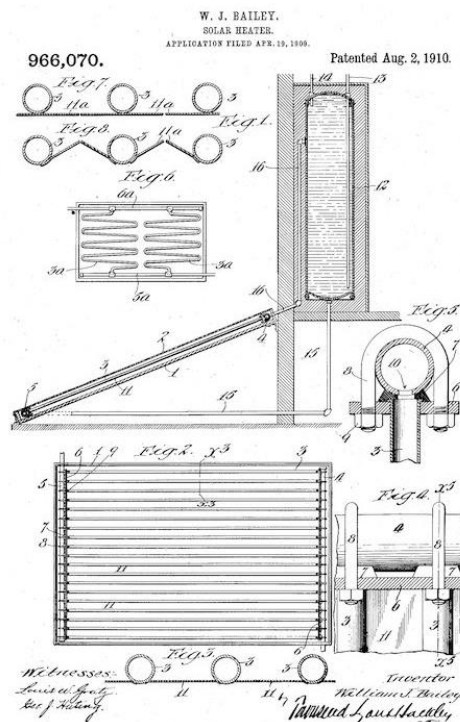


Ilustración 1 Termosifón de Bailey (5)

Durante la Segunda Guerra Mundial, el cobre, de amplia aplicación en los colectores termo solares, aumentó sustancialmente su precio debido a su uso militar, lo que supuso un importante frenazo en la industria de los colectores que sin embargo se recuperó al terminar la guerra.

Esta tecnología limitaba su aplicación a zonas con climas relativamente templados durante todo el año pues por entonces no había sistemas para evitar la congelación del agua en los meses de invierno.

Cuando en la década de los setenta ocurrió la subida del precio del petróleo, se focalizaron los esfuerzos en el desarrollo de fuentes de energía alternativas, con énfasis en la investigación en la solar para su uso en la estación espacial. A finales de siglo, comienza también la concienciación con el problema del calentamiento global que insta a la reducción en el consumo de combustibles fósiles. De

esta forma, se desarrollan tecnologías que permitían el uso de los colectores solares en climas con menores temperaturas al incorporarse anticongelantes. (6)

Desde los ochenta hasta la actualidad, se han dado múltiples ayudas a la investigación en energía solar que impulsaron su desarrollo y desde entonces han surgido múltiples organizaciones cuyo objetivo es satisfacer las necesidades de energía renovable.

España y Australia son algunos de los países que mayores contribuciones han hecho al desarrollo de la energía termo-solar. Sin embargo, fue Israel en los años 90 quien creó un nuevo tipo de superficie que mejoraba de manera sustancial el rendimiento de los colectores: las superficies negras selectivas.

Actualmente, España es el cuarto mayor fabricante y el líder de tecnología solar del mundo. La mayoría de la energía solar producida en España se exporta a toda Europa. (7)

1.2.1.2 El Potencial solar en Europa

Según un estudio realizado por Eurostat en 2016, España es el país en el que más se utiliza la energía solar térmica (2,5 millones toe), seguido de Alemania (0,7 millones toe). Sumando el uso de energía solar fotovoltaica, se obtiene el potencial solar total utilizado, siendo los siguientes los países a la cabeza en el aprovechamiento de la energía procedente del sol.

- Alemania 4 millones toe
- España 3,2 millones toe
- Italia 2,1 millones toe

Si se comparan estos números con los potenciales solares de los distintos países recogidos en la Ilustración 2, se observa cómo regiones como Francia (0,8 millones toe) o Grecia (0,5 millones toe), donde hay mucho sol, no aprovechan la capacidad disponible. (8)

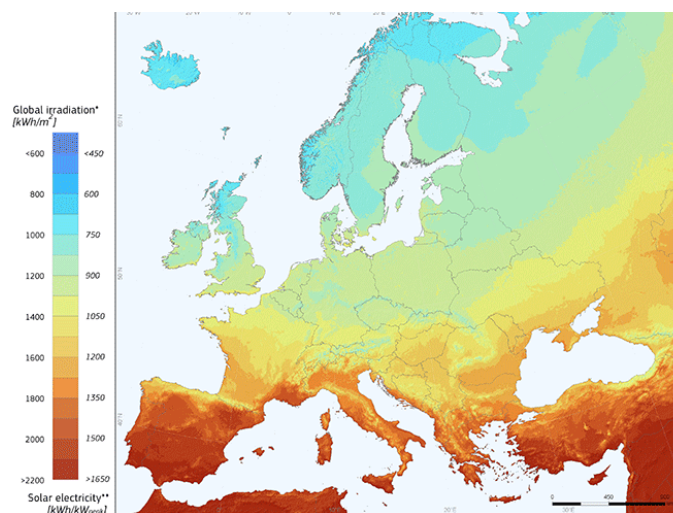


Ilustración 2 Mapa del potencial solar de Europa (9)

El NREP, detalla cuáles son los compromisos y estrategias de cada uno de los estados Miembros de la UE para alcanzar el objetivo vinculante de 2020 relativo al consumo energético. Además, la política de Cohesión de la UE que promueve la cohesión social y territorial y se usa también para promover la energía solar.

Uno de los obstáculos que ha encontrado hasta ahora el uso de la energía solar para su extensión, es el impacto negativo que puede tener la instalación de las placas en el paisaje y sobre la biodiversidad.

Definiendo el potencial solar como la radiación solar físicamente disponible sobre la superficie terrestre, que puede ser convertida en calor o electricidad (10), varios estudios en Europa han procurado estimar el potencial real, basándose principalmente en datos obtenidos de satélites meteorológicos. Sin embargo, el potencial solar se reduce considerablemente cuando se tienen en cuenta factores técnicos, sociales, económicos y medioambientales.

La energía solar se puede considerar socioeconómica y medioambientalmente beneficiosa, mediante un diseño, planificación y gestión adecuados, pero para lograr una aplicación más extensa y rápida, es necesario que se establezcan incentivos o modelos innovadores que reduzcan los elevados costes iniciales.

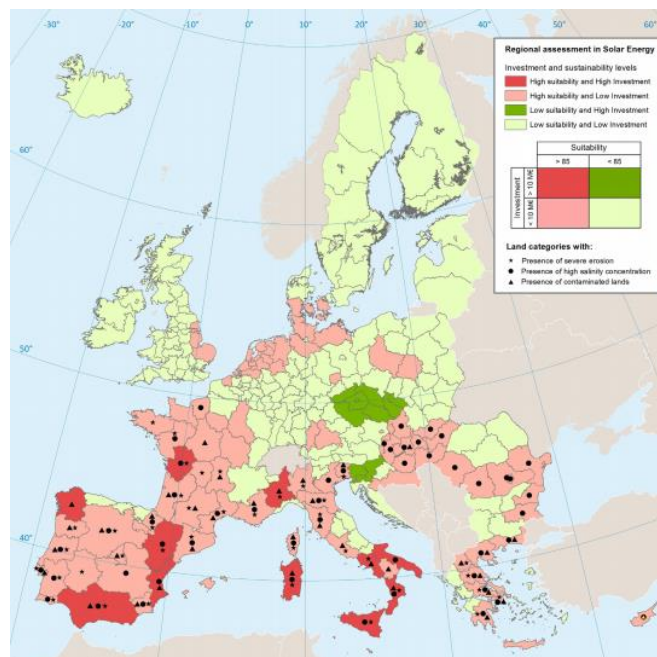


Ilustración 3 Potencial e Inversión en energía solar en Europa (11)

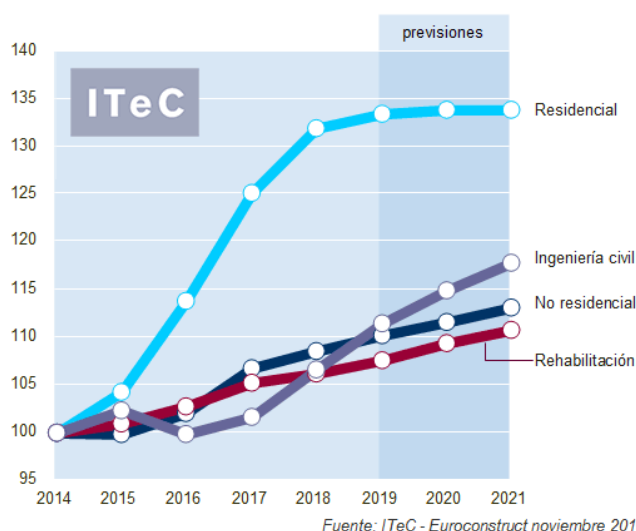
En la Ilustración 3, se recoge cuál es el potencial solar de las distintas regiones europeas, así como el nivel de inversión realizado en ellas. Se puede comprobar que aún hay muchas zonas, principalmente en el sur de Europa y los países mediterráneos, en los que el potencial solar está desaprovechado debido a la falta de inversión.

1.2.2 Sector de la edificación en Europa

Además de suponer el 40% del consumo energético de la UE, los edificios también son responsables de emitir aproximadamente el 36% del CO₂ (12), por lo que una mejora de la eficiencia energética de los edificios tendría un alto impacto social y medioambiental.

Sin embargo, el 35% de los edificios de la UE tienen más de 50 años y casi el 75% realiza un uso ineficiente de la energía habiendo una renovación del parque inmobiliario de entre 0,4% y 1,2% en función del país. Por ello la rehabilitación de edificios ya existentes puede tener un papel fundamental en la reducción de consumo de energía y de emisiones de CO₂. (12)

Según el informe Euroconstruct de noviembre de 2018, sin embargo, el mercado europeo de la construcción se encuentra actualmente en un buen momento con cifras de producción por encima de las de 2007 en nueve de los diecinueve países que analiza el informe. En 2018, el crecimiento del sector fue del 2,8% y las expectativas para 2019 son del 2%, continuando dicha tendencia de crecimiento hasta 2021 aunque a ritmos menores. (13)



Gráfica 1 Evolución de subsectores en la construcción (13)

Como se ve en la gráfica, la construcción residencial de nueva planta ha sido el sector que mayor crecimiento ha experimentado en los últimos años, pero se espera un estancamiento debido a que se han iniciado muchas construcciones de manera que ahora hay que absorber 5,5 millones de viviendas que saldrán a la venta entre 2019 y 2021 en un contexto de precios altos.

Las edificaciones no residenciales seguirán creciendo de un modo sostenido pero moderado, basándose en la suposición de que no hay exceso de oferta. El mal momento promotor de Reino Unido, supone también un estancamiento en la construcción de oficinas.



En la UE, la eficiencia energética está promovida por la Directiva 2010/31/UE (EPBD) relativa a la eficiencia energética de los edificios (revisada en la Directiva 2018/844) y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética.

Según la EPBD, los países miembros de la UE deberán establecer estrategias de renovación a largo plazo cuyo objetivo final sea la descarbonización del parque inmobiliario, para lo cual se promoverán las tecnologías inteligentes que regulen mediante sistemas de control y automatización parámetros como la temperatura interior. Se exigirá también que los países expresen sus requerimientos de actuación energética de una manera que permita la comparación internacional. La salud y confort de los usuarios del edificio son cruciales.

Por otro lado, para 2020, todos los edificios de nueva construcción deberán de ser edificios nZEB. También exige que en los alquileres o ventas de edificios se presenten las correspondientes certificaciones de eficiencia energética. Los países además deben de establecer requerimientos de actuación de energía mínima óptimos en costes para todos los edificios nuevos y para las rehabilitaciones de edificios antiguos. Así mismo, los sistemas de acondicionamiento de aire y calefacción se revisarán mediante esquemas establecidos.

Además, para 2030, las renovables deberían suplir la mitad de la energía térmica de Europa con hincapié en los edificios. Para ello, la energía solar mediante colectores no acristalados integrados en fachada es una solución interesante, ya que es una tecnología simple y de las más baratas disponibles.

1.2.3 Trabajos previos en la UPV cooperación educativa con Tecnalía

Este trabajo se encuadra dentro de una de las líneas de trabajo que Tecnalía desarrolla en su área de *Building Technologies*, dirigida al desarrollo y aplicación de los colectores solares no acristalados para su integración en fachadas.

En esta línea se desarrollaron previamente en el curso 2017-2018 los trabajos de Marina Palacios (14) y Mikel Lumbreras (15). Estos proyectos trataron el funcionamiento de sistemas de colectores no acristalados integrados en fachada con sistemas de bomba de calor y DH respectivamente.

En el caso de la implantación con bomba de calor se desarrollaron los cálculos necesarios para conocer el funcionamiento de dichos sistemas para distintas condiciones climáticas, analizando lo que dichas condiciones suponen al aporte energético disponible y la demanda de energía. Las conclusiones más relevantes de este proyecto fueron:

- La instalación de colectores solares en fachada permite una radiación más estable a lo largo del año, obteniéndose mejores resultados para latitudes más bajas.
- Un mayor valor del offset supone un peor rendimiento del sistema bomba de calor,

reduciéndose el aporte solar y aumentando el debido al calor exterior.

- El tamaño del depósito afecta de modo contrario; a mayor depósito, mejores COPs.

Por otro lado, en el caso de las redes de DH, se desarrolló un estudio energético para comprobar la viabilidad técnica y económica de la instalación de colectores solares térmicos y los beneficios del conexionado con un sistema de DH. Algunas de las conclusiones y previsiones a futuro más relevantes de este trabajo fueron:

- Los colectores solares no acristalados tienen rendimientos aceptables para temperaturas de hasta 50 °C.
- En funcionamiento con un sistema de control permanente que controle el ΔT , los colectores no acristalados resultan perfectamente viables para instalaciones de DH.
- La opción más beneficiosa pasa por la conexión a la línea de retorno para aumentar la temperatura de esta para reducir el gasto de combustible.

1.3 Objetivos y alcance

1.3.1 Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es la realización de un estudio paramétrico para la optimización del diseño de colectores solares no acristalados para su integración en fachada.

Mediante este proyecto, además, se busca obtener una serie de modelos validados que permitan calcular con rapidez y de modo sencillo el rendimiento que tendría un colector de determinadas características.

Estos objetivos se lograrán mediante la consecución de una serie de objetivos secundarios que marquen el camino de la investigación que irán definiéndose a lo largo del estudio. Estos objetivos son:

- Estudiar el estado actual de la investigación relacionada con colectores solares no acristalados integrados en fachada.
- Definir metodologías de cálculo simplificado mediante la aplicación del primer principio de la termodinámica a colectores.
- Realizar los cálculos de transmisión de calor de varias geometrías de colector para obtener su rendimiento.
- Realizar un barrido de datos para conocer cómo afecta la variación de las condiciones ambientales al rendimiento del colector.
- Realizar un barrido de datos para conocer cómo afecta la variación de distintos parámetros geométricos y el uso de diferentes materiales al rendimiento.
- Comparar y analizar los resultados obtenidos para distintas configuraciones.



- Realizar un presupuesto de los colectores, detallando los elementos necesarios para su configuración óptima.
- Realizar una evaluación económica del proyecto.

1.3.2 Alcance

Este proyecto incluye la realización de todos los cálculos que caracterizan el diseño de varias geometrías diferentes de captadores solares y la validación del modelo comparándolo con datos experimentales.

En este trabajo no se tendrá en cuenta el rendimiento del sistema completo con el que trabaje el colector (DH, bomba de calor...).

A continuación, se muestra el WBS del proyecto para detallar el alcance:

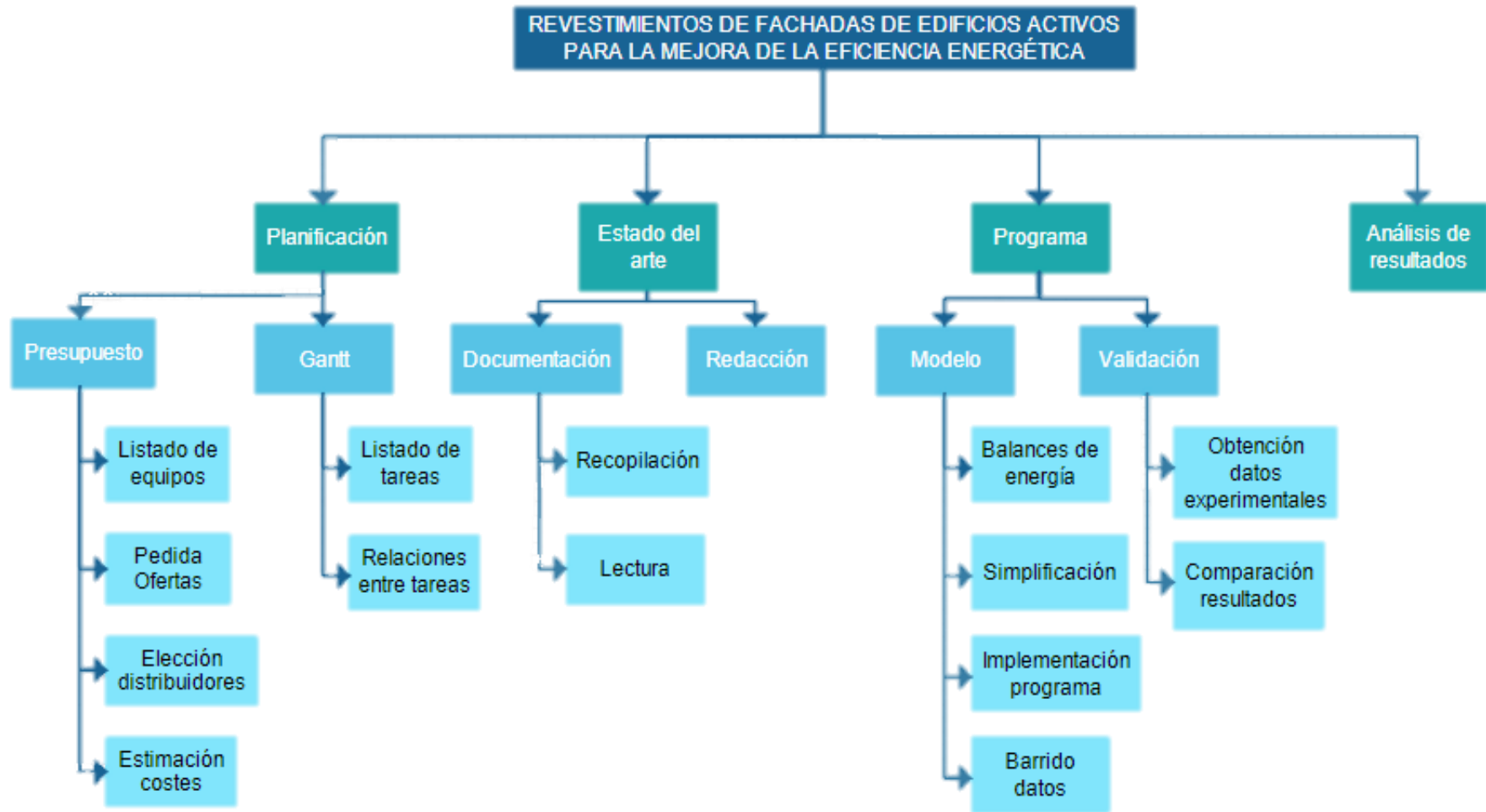


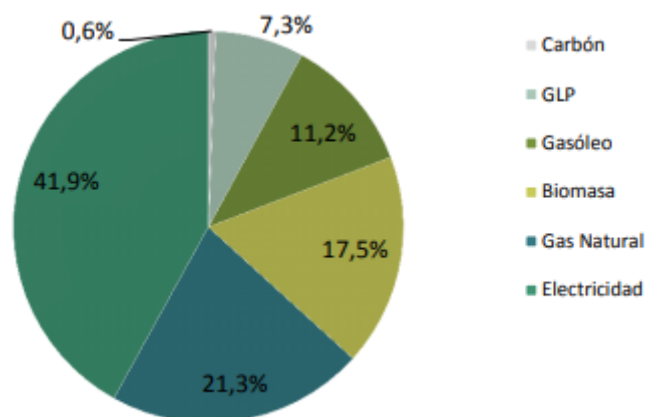
Ilustración 4 WBS del proyecto

1.4 Beneficios que aporta el trabajo

Dadas las investigaciones previas realizadas en Tecnalia ya mencionadas, queda justificado el campo de aplicación que tendrían los colectores solares no acristalados para su integración en fachada. De ahí que el desarrollo de este trabajo sea interesante dado que el éxito del mismo presenta múltiples beneficios, principalmente para la comunidad investigadora que podrá apoyarse en estos resultados para sistematizar el estudio teórico de nuevos modelos de colectores, lo que supondrá una reducción en los costes de investigación al no tener que realizar prototipos para probar los distintos modelos de colector, además de agilizar los estudios.

El hecho de que la investigación de este tipo de sistemas se desarrolle rápidamente, supone que la proliferación de esta tecnología ocurra de un modo algo más inmediato. Esto es muy ventajoso desde el punto de vista medioambiental ya que el uso de colectores no acristalados para la integración en fachada es una manera de obtener energía limpia en la edificación, de forma que se reducirían las nada despreciables emisiones de CO₂ de los mismos.

Actualmente, en España, la generación de energía para calefacción y ACS procede de las siguientes fuentes:



Gráfica 2 Fuentes de energía para calefacción en edificación (16)

Mediante la incorporación de energía solar térmica a los edificios, un estudio del IDAE, ha estimado que se podrían lograr reducciones de un promedio del 16% de las emisiones de CO₂, destacando principalmente el caso de las viviendas unifamiliares (38%), además de suponer una importante mejora de la eficiencia energética en el 42% de los casos (16). Esta reducción de emisiones, en la actualidad está muy motivada como consecuencia del protocolo de Kyoto que lucha contra el calentamiento global.

Otro beneficio de estos sistemas es que se obtiene un mayor aprovechamiento del potencial solar. Como se ha visto anteriormente, en muchas regiones de Europa, hay aún un elevado potencial solar que no es utilizado debido a la falta de inversión. El uso de colectores solares integrados en fachada

supone poder explotar el potencial solar en los núcleos urbanos de un modo que no ha sido accesible hasta ahora, multiplicando de manera considerable la superficie de captación de forma que a largo plazo se lograría un mix energético con un aporte mayor de energías renovables, con un coste de instalación similar al de una fachada tradicional.

Los resultados de este estudio pretenden servir de base para la optimización del diseño del revestimiento de fachadas de edificios activos, es decir, obtener los parámetros que harán de los colectores integrados en fachada una solución de buen rendimiento pese a su colocación con inclinación y orientación no óptimas. Con ello, cabe esperar que se logre diseñar un sistema que sea económicamente interesante.

1.5 Análisis del estado del arte

Las fachadas son el parámetro exterior de los edificios, y normalmente la única parte que se percibe desde el exterior, expresando el carácter y el estilo del edificio, por lo que es un elemento muy importante en la arquitectura. Sin embargo, también tienen una componente utilitaria al actuar como aislante térmico, acústico e impidiendo que entre el agua. El desarrollo sostenible requiere que se creen fachadas innovadoras y multifuncionales que armonicen la relación con el medio ambiente, integrando la estética con la funcionalidad de un modo exitoso.

Para lograr este objetivo, se han llevado a cabo varias investigaciones, como la de Murani y Roecker (17) que realizaron un estudio en el que se preguntó a más de 170 arquitectos sobre diferentes métodos de integración arquitectónica de colectores solares en fachada, demostrándose que los criterios estéticos de arquitectos e ingenieros son bastante diferentes. De dicho estudio se extrajeron una serie de pautas y conclusiones que pueden ayudar al diseño y desarrollo de futuros prototipos. En esta misma investigación, resultó que dos de las propuestas mejor aceptadas por los arquitectos resultaron funcionar con colectores solares térmicos no acristalados.

Otro problema de los colectores solares integrados en fachada es que la colocación vertical supone una pérdida de rendimiento en los mismos, al no ser óptimo el ángulo de inclinación. Sin embargo, la pérdida de rendimiento debería verse compensada con el aumento de la superficie disponible para colectores (entre 1,5 y 2 veces), y no solo eso, sino que, además, los tejados de los edificios quedarían libres para otro tipo de usos y actividades por lo que los inconvenientes se compensan con los beneficios potenciales.

De todas formas, queda un importante camino que recorrer para conocer más en profundidad este tipo de sistemas y así poder optimizar su rendimiento, sabiendo además cómo se ven afectados los colectores por diferentes condiciones tanto ambientales como de diseño.

1.5.1 Colectores solares térmicos no acristalados

Los colectores solares no acristalados (UC por sus siglas en inglés), son el tipo de colector más simple. Básicamente, consisten en un absorbente de metal con un aislante en la parte trasera, o en un absorbente polimérico, aunque últimamente los materiales cerámicos también han atraído la atención del mercado. Dispone de un sistema de tuberías hidráulicas conectado con o formando parte integral del absorbente que es el encargado de absorber la radiación y transmitirla al fluido circulante. Esta tecnología representa el 8,4% de los colectores solares térmicos instalados en el mundo y el 4,5% de la potencia instalada en la Unión Europea (18).

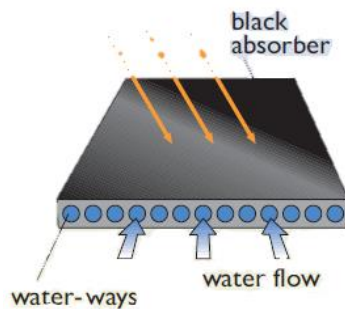


Ilustración 5 Esquema de un colector solar no acristalado (19)

Los absorbentes metálicos alcanzan temperaturas mayores que los plásticos debido a la mayor conductividad térmica del material. Al ser tan sencilla, es una tecnología barata, sin embargo, también presenta enormes pérdidas de energía. Como consecuencia de esto, este tipo de colectores ofrece un mayor rendimiento cuando las temperaturas son cercanas a la del ambiente. De hecho, comparándola con otros tipos de colectores, se comprueba que esta tecnología es la que mejor rendimiento presenta, trabajando con incrementos de temperatura de 10-15 °C.

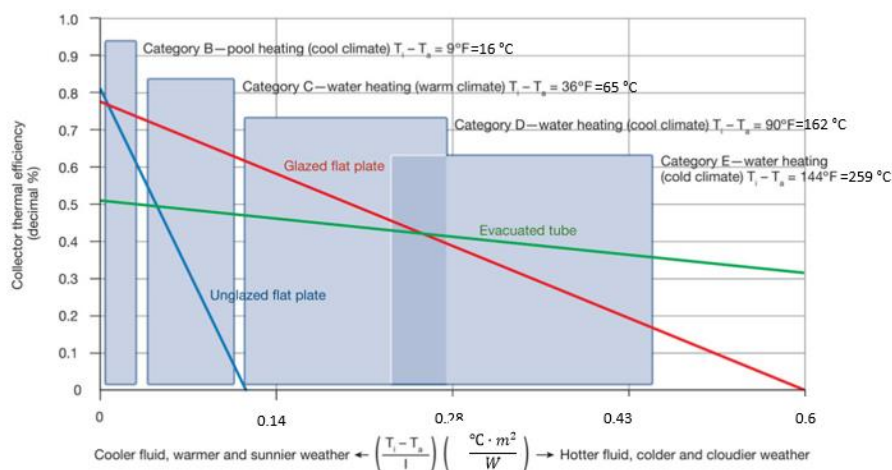


Ilustración 6 Eficiencia colectores en varias categorías (20)

La instalación de colectores térmicos en fachada tiene notables ventajas como la disponibilidad del espacio y mayor recepción de energía durante el invierno. Con los sistemas tradicionales sobre

cubierta, las variaciones estacionales de producción de calor pueden hacer difícil dimensionar el sistema según la demanda de calor. Sin embargo, para latitudes intermedias, los colectores verticales pueden ser una solución sensata, puesto que la producción de calor estará mejor distribuida durante el año. Además, se incrementa de un modo importante la superficie potencialmente expuesta.

Otra ventaja de este tipo de tecnología es el hecho de que la cubierta no acristalada podría permitir el desarrollo de soluciones integradas en superficies curvas.

1.5.2 Otras tecnologías

1.5.2.1 Colectores solares transpirables

Los colectores solares transpirables, son una tecnología ampliamente extendida en Estados Unidos y Canadá, pero relativamente novedosa para los países europeos. Básicamente, se trata de colectores no acristalados con pequeñas perforaciones de manera que la energía solar calienta el absorbente, metálico normalmente, que al mismo tiempo comunica este calor al aire ambiente. La superficie de intercambio en este tipo de colector aumenta al pasar aire al espacio que queda entre el colector y el edificio. Se calcula que el 62% del intercambio de calor ocurre en la superficie exterior del colector, el 28% en los propios agujeros del colector y el 10% restante en la superficie trasera (21).

Básicamente el sistema completo se compondría de una placa metálica perforada y una placa trasera, que para la integración en viviendas suele ser el propio edificio. El espacio de 100 mm y 300 mm entre ambos está sellado para crear un canal de aire que se conoce como pulmón. En la parte superior del edificio, se dispone de un conducto con un ventilador que el que genera el flujo de aire ambiente a través de los orificios.

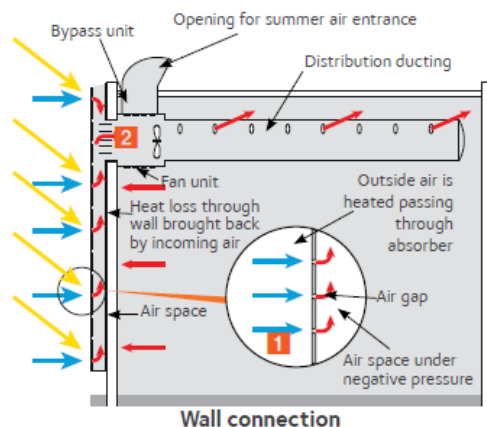


Ilustración 7 Esquema funcionamiento colectores transpirables (22)

La eficacia de los colectores solares transpirables es compleja puesto que en ella domina un aspecto u otro en función de las condiciones ambientales. Algunos de los parámetros más influyentes son los que se presentan a continuación:

- Las condiciones climáticas: radiación solar, temperatura ambiente, efecto del viento, lluvia o humedad.
- La ubicación: orientación, inclinación o entorno.
- La geometría del colector: tamaño, profundidad del pulmón, el recubrimiento del absorbente, el material o la porosidad.
- La geometría de los agujeros: diámetro, forma, colocación o profundidad.
- Los parámetros del edificio: U del edificio o área de la pared.
- Las características de carga: el proceso del aire, la recirculación, velocidad del ventilador etc...

Se puede comprobar que las múltiples investigaciones llevadas a cabo sobre este tipo de colectores, demuestran que la escasa superficie y la posibilidad de vientos fuertes, convierten este sistema en poco adecuado para edificios de gran altura.

A continuación, se explica el ejemplo de *SolarWall* que utiliza esta tecnología.

1.5.2.1.1 Colectores de SolarWall

SolarWall es la propuesta diseñada por la compañía *Conserval*, líder en el mercado renovable que ellos mismos crearon; calefacción solar por aire. En los últimos 30 años, los ingenieros de *Conserval* se han dedicado a mejorar *SolarWall*, desarrollando múltiples tecnologías. (23)

Es una tecnología ampliamente aceptada por arquitectos e ingenieros, el calor del sol se utiliza para calentar el aire acondicionado del edificio, minimizando el consumo de energía. Es un sistema que existe en numerosos colores y perfiles de forma que se caracteriza por su versatilidad arquitectónica.



Ilustración 8 Aplicación colectores SolarWall (22)

El sistema *SolarWall* produce aproximadamente 600 W/m^2 mediante el siguiente método de funcionamiento: el sol calienta el aire de la superficie del colector que es arrastrado al interior del sistema de ventilación mediante pequeños orificios. En días soleados el incremento de temperatura de este aire puede estar entre los $16 \text{ }^\circ\text{C}$ y los $38 \text{ }^\circ\text{C}$ sobre la temperatura exterior. Como calienta el aire

exterior, también mejora la calidad del aire interior. La eficiencia de este sistema es superior al 80% y reduce el consumo energético entre un 20% y un 50%. (22).

Actualmente el sistema ha evolucionado dando paso a *SolarWall 2*, que en este caso es un colector solar acristalado con aire como fluido caloportador. El sistema actual con mayores incrementos de temperatura, entre 20 °C y 47 °C sobre la temperatura ambiente, hace de esta una tecnología más aplicable para la calefacción de espacios. Además, este modelo funciona bien para condiciones de viento.

El principio de funcionamiento es el mismo que el de su predecesor, pero en este caso el aire se calienta una segunda vez al pasar por la segunda etapa. Este sistema permite lograr hasta un 54% más de energía térmica (25).

1.5.2.2 Flat-plate acristalado

Están compuestos por una placa absorbente, que suele consistir en una placa metálica de gran conductividad térmica, con tubos adheridos o integrados. Dicho absorbente se recubre con un material que permite maximizar la energía absorbida y minimizar las pérdidas por radiación. Detrás del absorbente, suele haber una capa de aislante y por delante del absorbente una cubierta de cristal que tiene la doble función de permitir pasar el sol y producir un efecto invernadero que evite las pérdidas de calor.

El problema de estos colectores es que en verano tienden a sobrecalentarse y las partes más sensibles se dañan.

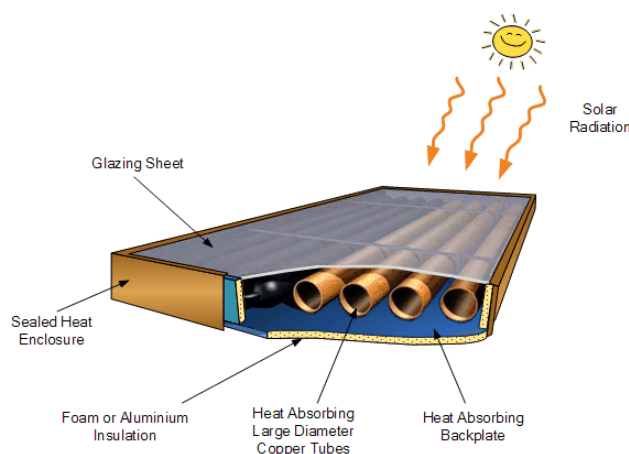


Ilustración 9 Colector solar acristalado de placa plana (26)

1.5.2.3 Tubo de vacío

Los tubos de vacío están compuestos por varios tubos en los cuales el absorbente se encuentra suspendido en el vacío, de forma que las pérdidas de convección y conducción con el exterior se reducen aumentando la eficiencia para temperaturas elevadas, como se puede observar en la Ilustración 6. Adicionalmente, se pueden conseguir mayores eficiencias gracias a la posibilidad de los

absorbentes de orientarse en el interior de los tubos para adaptarse a la radiación incidente, luego su eficiencia es buena tanto en planos verticales como horizontales.

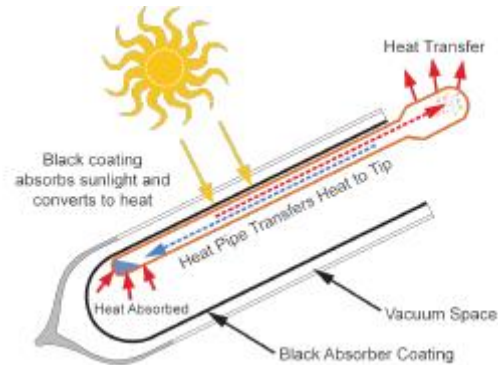


Ilustración 10 Esquema de los tubos de vacío (27)

1.5.2.4 Parabólicos

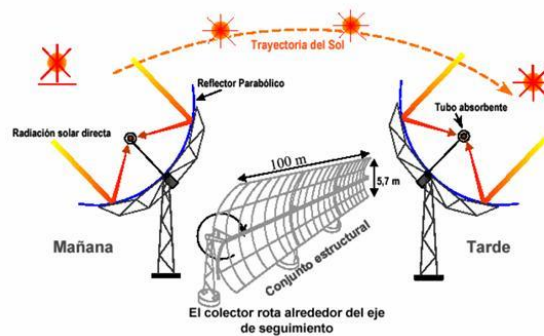


Ilustración 11 Esquema de colector parabólico (28)

Los captadores parabólicos son un tipo de captador solar térmico que utiliza cilindros parabólicos para concentrar la radiación solar en un punto. Por el foco de la parábola pasa una tubería que recoge la radiación solar de manera concentrada. Hasta hace poco, este tipo de sistemas no estaban disponibles para uso doméstico, pero recientemente se han desarrollado los sistemas de cilindro parabólico compactos (CPC) con formato y dimensiones similares a las de captadores planos, pero con mejores eficiencias

Los captadores están formados por unas conducciones con un revestimiento selectivo que recorren el captador longitudinalmente reflejando la radiación solar para logran una mayor concentración de potencia por unidad de superficie. Sirven para la producción de ACS, apoyo de calefacción o alimentación de equipos de frío por adsorción o absorción.

1.5.3 Sistemas para el uso de colectores no acristalados

Tradicionalmente, los colectores no acristalados se han utilizado para el calentamiento de piscinas, para precalentar agua caliente sanitaria (ACS) o calefacción de baja temperatura. Sin embargo,

funcionando en conjunto con un sistema de boba de calor o *district heating*, el rendimiento del sistema aumenta, ampliando así el campo de aplicación de esta tecnología.

1.5.3.1 Pre calentamiento de ACS

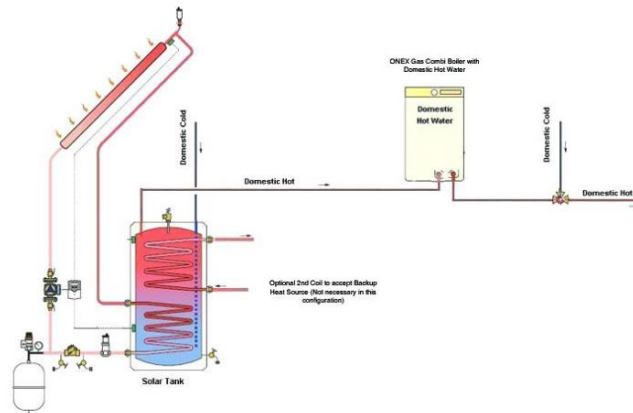


Ilustración 12 Esquema funcionamiento precalentador solar (29)

Los precalentadores de agua son equipos que puede integrarse con otros sistemas para mejorar su eficiencia y mitigar sus debilidades. Entre las ventajas que supone, se encuentra por ejemplo el hecho de que el trabajo que debe realizar el sistema para aportar agua a la temperatura deseada es menor. En un tanque de agua caliente, el precalentamiento supone que es necesaria menos energía para llevar al agua a la temperatura de operación y por lo tanto el consumo de otro combustible será menor.

1.5.3.2 Calefacción de baja temperatura

Un sistema de calefacción de baja temperatura es aquel que utiliza una caldera de condensación con radiadores de baja temperatura de forma que la temperatura de calefacción es lo más baja posible. Este tipo de instalaciones ahorra energía y reduce las emisiones contaminantes proporcionando además un gran confort térmico. Se considera calefacción de baja temperatura a aquella que tiene una temperatura media de trabajo entre 35 y 60 °C. (30)

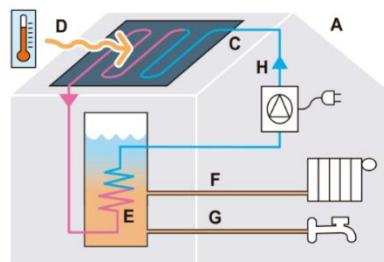


Ilustración 13 Instalación calefacción baja temperatura (31)

Actualmente, uno de los sistemas de calefacción de baja temperatura más en alza es el suelo radiante. Consiste básicamente en una red de tubos instalados debajo del pavimento y de una capa de mortero por donde circula el agua caliente a una temperatura de entre 30 °C y 45 °C lo que el convierte en el sistema de calefacción con menor temperatura de impulsión. Como referencia, un sistema de calefacción con radiadores convencionales utiliza agua a una temperatura aproximada de 70 °C. (32)

1.5.3.3 Bomba de calor

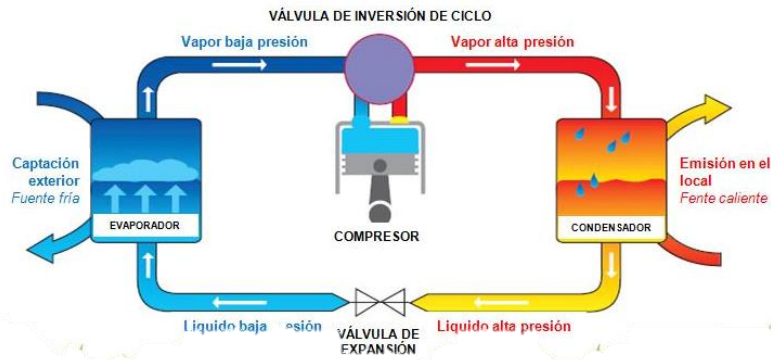


Ilustración 14 Esquema instalación bomba de calor (33)

Una bomba de calor es una instalación termodinámica que consiste en transportar energía en forma de calor, que se genera a través del cambio de fase de gas a líquido de un fluido con ayuda de un compresor, a un ambiente. Se emplean en equipos de climatización para calefacción y ACS, aunque en el caso de las bombas de calor reversibles puede aprovecharse también para aportar frío local.

Las más utilizadas para colectores solares son las bombas de calor agua-agua en la que el sistema toma calor de un circuito de agua en contacto con el colector para transferirlo a otro circuito de agua que abastecerá al sistema de calefacción o refrigeración. (34)

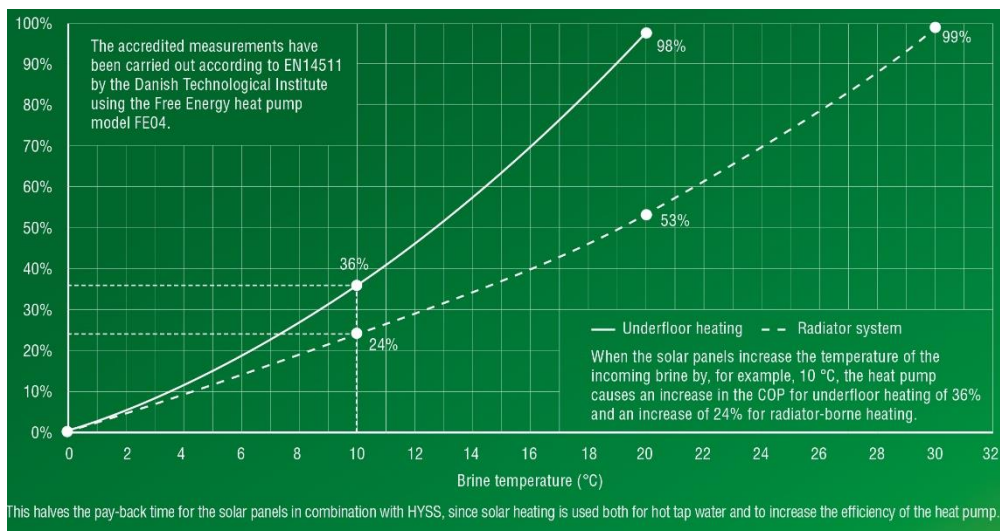


Ilustración 15 COP vs. Temperatura del primario (35)

Un estudio detallado del funcionamiento de estas tecnologías con colectores solares no acristalados, fue desarrollado como previamente se ha comentado, en el trabajo de fin de máster de Marina Palacios (14).

1.5.3.4 District heating

La calefacción urbana o *district heating*, es un sistema para el suministro de calefacción y ACS a distintos edificios a partir de una planta central cuyo calor se entrega a los consumidores mediante una red de tuberías aisladas y enterradas. Este tipo de sistemas puede cubrir desde un pequeño número de edificios hasta áreas metropolitanas completas. (36)

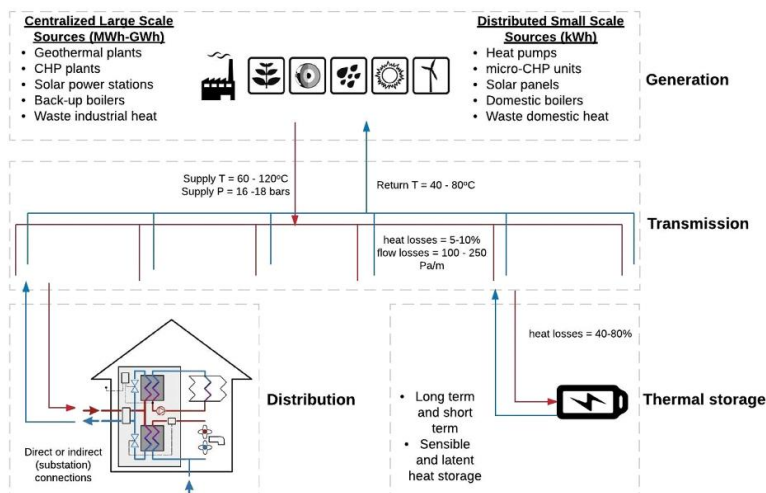


Ilustración 16 Esquema de una instalación de DC (36)

Los sistemas tradicionales de DC están formados por la central térmica en la que se genera la energía de forma centralizada, la red de distribución y la subestación de transmisión térmica en los edificios.

Sin embargo, el desarrollo de colectores solares térmicos para su instalación en fachada genera nuevas posibilidades como el surgimiento de los *prosumidores* que son productores y consumidores al mismo tiempo.

| | Supply | | Return | |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Maximum | Minimum | Maximum | Minimum |
| Conventional grid | 115 | 65 | 50 | 25 |
| Low-temperature grid | 70 | 50 | 40 | 25 |

Sources: Energy Development and Demonstration Program (2014); Finnish Energy Industries (2007).

Ilustración 17 Rangos de temperaturas del agua en DC (37)

De nuevo, cabe mencionar el trabajo previo, comentado anteriormente, realizado en este caso por Mikel Lumbreras, en el que se detallan las condiciones para un funcionamiento adecuado de estos sistemas de DH con colectores solares en fachada. (15)

1.5.4 El problema de la integración

Como previamente se ha mencionado, el problema de la integración es uno de los principales retos a los que se enfrenta actualmente la colocación de colectores solares térmicos en fachadas de edificios. Entrando en más detalle en la investigación llevada a cabo en (17), hay varios aspectos a considerar para lograr el uso extensivo de la tecnología.

Los sistemas que han salido al mercado hasta la fecha se caracterizan por una calidad arquitectónica muy baja. El grado de flexibilidad que tienen es mínimo tanto en términos de color y forma como de tamaño, lo cual hace que los arquitectos no se sientan atraídos para colocar en las fachadas unos elementos que se han concebido como puramente técnicos. Sin embargo, cada vez se están realizando más esfuerzos por alcanzar una integración efectiva desde diversos frentes creando colectores con formas diferentes de la rectangular tradicional, distintas pinturas que favorezcan la absorción de energía al mismo tiempo que aportan una mayor adaptación estética y con diseños más cuidados. Más adelante se hablará en más profundidad de las soluciones encontradas.

En la Ilustración 18, aparecen recogidos los resultados de la encuesta realizada por Murani y Roecker, con las distintas propuestas de colectores colocados en edificios que se presentaron. Como se puede ver, la opción ganadora resultó ser el caso 6 que consiste en un sistema de colectores instalado en el balcón de los edificios. En este caso la integración es bastante exitosa tanto para ingenieros como para arquitectos y es una solución muy similar a la que se utilizó en el proyecto *RhOME* del que se hablará posteriormente. Otras soluciones con buenos resultados en este estudio son los casos 8 y 10, ambos funcionando con colectores no acristalados. Son los colectores diseñados por *SolarWall* y *Energie Solaire* respectivamente, proyectos de los que se habla más detalladamente en el trabajo.



Ilustración 18 Resultados de la encuesta realizada en (17)

Además de la parte estética, el desafío aumenta cuando los colectores se quieren llevar a los núcleos urbanos donde la ubicación no es un tema sencillo. En las afueras, con las casas unifamiliares y las zonas poco pobladas, los colectores con sus respectivos depósitos se colocan en los tejados y dejando de lado lo estético, no hay problemas de sombras que limiten la radiación incidente en los colectores o imposibiliten la adecuada orientación. En cambio, en ciudades, estos factores si son condicionantes

por lo que es muy complicado encontrar unas condiciones de instalación óptimas para los colectores. Además, es conveniente que los paneles no estén situados a mucha distancia de los depósitos y por ejemplo en un sistema colocado en el tejado tampoco existe una relación entre la capacidad de producción y el número de viviendas. Estas son algunas limitaciones que se encontraron en (38).

Es por ello por lo que las investigaciones van más en la línea de integración en fachada puesto que técnicamente hablando, se pueden encontrar bastantes ventajas en la bibliografía. Entre ellas, destaca la disponibilidad de espacio, muy relacionada además con el número de viviendas del edificio; la reducción de pérdidas de energía en transporte; la reducción del impacto ambiental y el ahorro en costes de energía; la mejora de la clasificación energética del edificio, lo cual aumenta el valor de la propiedad (39)

Actualmente, ya ha comenzado la hibridación de las envolventes de los edificios y aunque aún no sean un sistema muy común, cada vez hay más soluciones y diversos proyectos de investigación que desarrollan soluciones. Sin embargo, sigue existiendo un hueco en el mercado para paredes con acabado de mortero (donde entrarían los colectores masivos), fachadas ventiladas, paneles sándwich y otras soluciones (40).

1.5.5 Guías de integración

Para continuar por el camino de la extensión del uso de estas tecnologías, se ha considerado importante recoger las pautas que se desarrollan en (17).

- El uso de sistemas de energía solar con elementos de construcción debe facilitar el proceso de diseño. Es más fácil de seguir la lógica de un edificio cuando hay menos elementos a equilibrar.
- Se debe considerar el edificio como un todo para definir la posición y dimensión de los colectores. Para ello, hay que encontrar un equilibrio entre integración, producción de energía y la elección de la tecnología a adoptar y así definir cuál será el sistema más adecuado. En este contexto aparecen los elementos no activos que podría ampliar el rango de posibilidades.
- Los colores y materiales de los colectores se deben elegir en conjunto con los colores y materiales del edificio en general y el contexto en el que se sitúa.
- La forma y tamaño de los colectores se debe elegir considerando la composición de la fachada.

Para lograr estos objetivos, es importante saber también cuáles son las demandas de los arquitectos para elegir colectores solares como el material a utilizar en los cerramientos de sus proyectos. Esta fue otra de las preguntas de la investigación de (17) , de la que se puede concluir que:

- En lo referente a las texturas, lo más demandado son placas planas, ligeramente perfiladas y con acabado mate.

- En cuanto al color, 2/3 de los arquitectos opinaban que poder elegir el color del edificio era algo esencial, sugiriendo un 40% de ellos que la paleta disponible fuera de más de 20 colores. En cualquier caso, los colores más demandados siempre eran los grises.
- El tamaño de placa perfecto era de unos 30 cm de ancho y de largo libre.

Visto el nivel de exigencia de los arquitectos para considerar que la integración es exitosa, se deduce que el proceso de diseño debería de ser radicalmente distinto. El tipo de tecnología impone el material de la capa visible del colector y los elementos básicos del módulo del colector.

1.5.6 Tipos de cerramientos fachada ventilada

Existen distintos tipos de fachadas que conviene conocer para analizar cómo adaptar sobre ellos las tecnologías solares térmicas no acristaladas.

En general, son tipos de fachadas ventiladas que son un tipo de sistema constructivo que se ha ido consolidando con gran aceptación por sus múltiples ventajas como las posibilidades estéticas y sus ventajas de aislamiento térmico y acústico.

El sistema consta de un muro soporte, una capa de aislante y una capa de revestimiento. Entre el aislante y el revestimiento se crea una cámara de aire que activa una eficaz ventilación natural, manteniendo el aislamiento seco y consiguiendo así un gran ahorro energético.

1.5.6.1 Cerramientos de casete

Este tipo de cerramiento puede ser utilizado en edificios de nueva construcción o proyectos de rehabilitación. Consiste en un sistema de unión abierta, basado en el principio de pantalla para la lluvia. Es adecuado para su aplicación vertical en edificios de cualquier altura (41). Los paneles casete (ya sean de chapa maciza o composite) no están físicamente conectados los unos a los otros, y se colocan de forma independiente. Las proporciones suelen ser 1:1 o 1:4.

Sus ventajas son la apariencia horizontal, la excelente planitud y el hecho de que las uniones quedan ocultas.



Ilustración 19 Paneles casete (41)

1.5.6.2 Paneles de fachada

Son paneles autoportantes de chapa maciza de anchura en torno a 300 mm y unos 4 m de longitud que pueden ser colocados tanto en vertical como en horizontal. El impacto visual de las juntas del panel puede ser disimulado o acentuado variando su anchura de 5 mm a 25 mm.



Ilustración 20 Ejemplo de paneles de fachada (42)

Los paneles están atornillados o remachados al soporte metálico posterior. El espacio entre los perfiles no debe exceder los 60 cm (se reducirá en caso de carga de viento alta) (43).

1.5.6.3 Paneles sándwich

Los paneles sándwich están fabricados con un material aislante, como por ejemplo espuma sintética, que se coloca entre dos tableros que pueden ser metálicos, de madera, u otro material. A partir de esta definición, puede haber tableros más complejos que incluyen barreras de vapor por ejemplo, a otros más simplificados con tableros en una cara solamente.

Suelen ser paneles de densidad baja, cuya resistencia a la humedad depende de su composición. Entre sus ventajas destacan el aislamiento térmico y acústico.

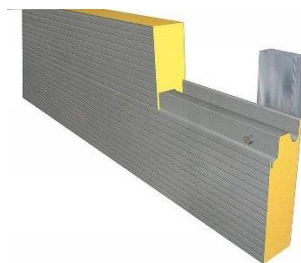


Ilustración 21 Panel sándwich (44)

1.5.7 Materiales

- **Revestimientos cerámicos:** Gracias a los grandes avances de I+D+I, existen baldosas de gres porcelánico de gran formato para las fachadas ventiladas. Este tipo de material presenta grandes ventajas frente a materiales más tradicionales como su precisión dimensional; la homogeneidad; una expansión por humedad poco significativa; su coeficiente de dilatación es reducido; es resistente a la corrosión, los ácidos, la radiación solar y las heladas y es fácil de limpiar.

Estos cerramientos existen en una amplia gama de colores, acabados formatos y texturas, lo

que los hace muy versátiles para su integración en edificios. (45)



Ilustración 22 Fachada ventilada en gres porcelánico (46)

- **Revestimientos pétreos:** Este tipo de revestimiento suele disponerse mediante anclajes mecánicos fijados al muro portante con taco químico. El hecho de revestir el edificio con placas de material pétreo supone muchas ventajas como son el aislamiento térmico que supone importantes ahorros en consumo energético, elimina la humedad y la condensación gracias al efecto chimenea, mitiga el efecto de isla de calor y mejora el bienestar.

Además, estéticamente el material ofrece una amplia gama de colores, formatos y texturas lo que supone un amplio abanico de posibilidades para el acabado del edificio. La tendencia actual, consiste en la combinación de piedras de colores claros con otras oscuras recurriendo a texturas y aspectos novedosos.

Por sus características, aporta puntuación positiva en la certificación energética de edificios según el sistema LEED en las áreas de eficiencia energética, materiales y recursos naturales, prioridad regional y calidad del ambiente interior. Su impacto medioambiental de fabricación se puede considerar neutro en comparación con materiales como la cerámica o el cristal. (47)



Ilustración 23 Fachada ventilada en piedra (47)

- **Revestimientos fenólicos:** Los revestimientos de paredes con panel fenólico son una gran solución en el diseño y construcción de espacios exteriores que requieren condiciones de uso extremas o que tienen una gran afluencia de usuarios. Los materiales fenólicos se fabrican a partir de resinas termo endurecidas en diferentes espesores y acabados según el uso que se le vaya a dar.

Estos paneles garantizan una excelente resistencia a la intemperie y estabilidad de color. Además, estos paneles son ventajosos por su bajo coste en comparación con otros sistemas, la rapidez de instalación, el poder de aislamiento acústico, la facilidad de limpieza y mantenimiento y la gran variedad de acabados. (48)

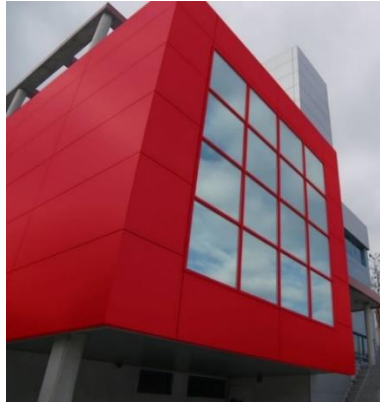


Ilustración 24 Revestimiento en panel fenólico (49)

- **Revestimientos de aluminio composite:** son paneles sándwich constituidos por un alma de polietileno intercalada entre dos chapas de aluminio. Su acabado ofrece una excelente protección y revestimiento que se caracteriza por la separación existente entre el edificio y el revestimiento.

Estos paneles se caracterizan por su elevada durabilidad consecuencia de su resistencia a la humedad, el impacto la radiación UVA la polución y abrasión; su excelente planitud que lo hace ideal para edificios de gran altura; la excelente uniformidad y variedad de los acabados y su compatibilidad con cualquier sistema de fachada y carpintería. Además, al estar fabricado con aluminio, son placas fuertes pero flexibles además de ligeras, ofreciendo gran fortaleza sin sobrecargar la estructura del edificio. (50)



Ilustración 25 Revestimiento aluminio composite (50)

1.5.8 Investigaciones destacables

Como se ha mencionado, se han localizado varias investigaciones que resultan interesantes para situarse en el estado actual del desarrollo los colectores solares no acristalados y se van a exponer a continuación.

1.5.8.1 Colectores SOLABS

El proyecto *SOLABS*, se encuadra en el marco de investigaciones de la Unión Europea, es un trabajo que se llevó a cabo entre febrero de 2003 y diciembre de 2006. Básicamente el objetivo del proyecto era desarrollar un colector solar térmico no acristalado para integrar en fachadas, recurriendo a recubrimientos con color selectivos sobre acero (51).

El estudio realizado en (17), fue el punto de partida para el desarrollo de este prototipo que está diseñado teniendo en cuenta todos los puntos que se han mencionado anteriormente, en lo referente a color, forma, unión entre colectores etc... La clave de este proyecto fue el escoger como punto de partida diseños ya existentes de cubrimientos de fachada metálicos, al darse cuenta de que un colector no acristalado en sí mismo es un cubrimiento metálico. De las opciones disponibles en el mercado, por cuestiones de viabilidad técnica se continuó con los módulos de casete y los paneles de fachada.

Con estas dos opciones se volvió a realizar una encuesta dirigida principalmente a los arquitectos, pero también a ingenieros y técnicos de fachadas concluyéndose que aun siendo válidas ambas opciones, los paneles de fachada tenían mejores resultados por tener dimensiones variables.

El producto que resultó consistía en una placa de 29 cm de ancho con uniones variables entre 0 y 2 cm en la que el sistema hidráulico está pegado a la parte posterior del colector asegurando una transferencia óptima de calor y una superficie perfectamente plana. Además, el sistema hidráulico de tubos horizontales está adaptado a la opción de longitud al corte y al ancho variable de la unión.



Ilustración 26 Aplicación de colectores SOLABS (52)

En cuanto al acabado, se tiene un acabado mate y plano y para cumplir con la petición de variedad de colores, se optó por aplicar al colector ya existente pintura coloreada selectiva, con esto, se puede mantener la economía de escala y la variedad de colores porque no se limita la fabricación de un color por la demanda del mismo. Cabe mencionar que no todos los colores tienen la misma eficiencia, luego el equilibrio entre diseño y rendimiento será algo a considerar por los proyectistas de los edificios.

1.5.8.2 Sistema Energie Solaire

La empresa suiza *Energie Solaire*, comercializa su *TOITURE SOLAIRE AS* como una solución estética, efectiva y económica. Posee las características de un colector no acristalado de acero inoxidable, que no se aplica simplemente en la fachada, sino que se integra con ella, de hecho, hay que recordar que esta fue la tercera solución mejor evaluada en el estudio que se ha mostrado antes. Adicionalmente, además de un campo de colectores, es también una cobertura resistente. Este material es combinable con otros materiales.



Ilustración 27 Colectores de LA TOITURE SOLAIRE (53)

Este modelo, está ideado para servicios de media temperatura de gran tamaño como suministros que combinan la bomba de calor con la energía solar. Al igual que se afirma en el caso anterior, este colector se puede adaptar a nuevas construcciones o a la rehabilitación de edificios.

Entre las cualidades que anuncia, destaca la posibilidad de adaptarse a superficies curvas y a fachadas pese a ser un sistema ideado para tejados, la ausencia de riesgo de sobrecalentamiento y la resistencia, durabilidad y fiabilidad. Además, se minimiza el sobre coste debido a la doble función de captador y cobertura estanca.

Su recubrimiento selectivo es altamente eficiente y la ausencia de cristal hace que el factor de modificación del ángulo de incidencia amplíe el rango de uso de este colector. Los estudios que se han realizado muestran una producción anual de entre 350 y 750 kWh/(m²·año)

Tabla 1 Características del colector Energie Solaire (53)

| | |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Peso del colector | 9,8 kg |
| Contenido en fluido | 2,52 l/m ² |
| Presión máxima | 3 bar |
| Flujo nominal | 40 l/(h·m ²) |
| Fluido caloportador | Agua sin ion cloro, con anticongelante e inhibidor de la corrosión |

| | |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Características ópticas de la capa selectiva | $\alpha \geq 0,94 \quad \varepsilon \leq 0,18$ |
| Según DIN EN 12975-2 | $\eta_0=0,95 \quad a_1=9,81 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad a_2=0,047 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| Aporte solar | $500-770 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| Potencia pico (EN 12975-2) | 1748 W |
| Solar keymark nº | 011-7S667 |

En cuanto a sus dimensiones, *TOITURE SOLAIRE AS* tiene un espesor de 25mm, se trata de un rectángulo de 860 mm con una longitud de 881 mm en el eje transversal de los perfiles. La longitud es modulable para adaptarse al tejado o fachada, pero existen captadores estándar con una superficie de 2 m² (53).

1.5.8.3 Proyecto BATISOL

Los captadores diseñados por NOBATEK y Tecnalía, se caracterizan por ser opacos, diseñados para usos de baja temperatura, bajos en costes y perfectamente integrables en fachadas metálicas.

El captador está formado por una superficie captadora revestida con pintura selectiva, un cuerpo sobre el que se mecaniza el circuito hidráulico y conectores hidráulicos de entrada y salida. (54)

BATISOL busca integrarse con las edificaciones actuales, siendo un tipo de colector que pueda modularse en tamaño y con uniones en seco, facilitando su integración con sistemas de construcción convencionales para así sustituir o trabajar en conjunción con materiales comunes. Por ejemplo, podría realizarse una fachada con paneles BATISOL, que serían sustituidos por elementos convencionales no activos donde por tema de dimensiones, no fuera posible utilizar los colectores.

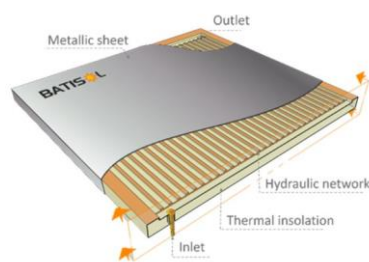


Ilustración 28 Estructura de panel BATISOL (55)

El panel BATISOL está pensado para funcionar en sistemas de fachada ventilada, ya que actualmente están en auge, por lo que dispone de una subestructura metálica que no solo soporta la capa de acabado de la fachada, sino que, además, sirve para alojar una capa de aislamiento térmico.

En lo referente a actuación térmica, BATISOL tiene las características habituales de los colectores no acristalados: para temperaturas de entre 10 °C y 15 °C sobre la temperatura ambiente y radiaciones de 500W/m², los rendimientos rondan el 50% 60% (18).

En los estudios (54), (55) se realizó un estudio paramétrico del captador en el que se extrajeron varias conclusiones que deberían ayudar al desarrollo optimizado de futuros colectores. Cabe destacar que los factores más influyentes en el rendimiento son la geometría y dimensiones de los canales y el acabado del colector.

Combinando este colector con sistemas de bombas de calor se obtiene COPs de 1,5-2 unidades.

1.5.8.4 Proyecto BASSE

Building Active Steel Skin Project (BASSE) es un proyecto de tres años co-financiado por la Unión Europea en el marco del Fondo de investigación para el programa de carbón y acero de la comisión europea.

El principal objetivo del proyecto es desarrollar envoltentes de edificios considerando principios biométricos que logren que actúe de forma similar a la naturaleza. En este caso, lograr que un fluido que almacene la energía absorbida por el sol a través de su piel de acero, mejore la eficiencia energética del edificio (56).

El prototipo está formado por tuberías de plástico circulares, ligeramente aplanadas por la cubierta con un diámetro exterior de 10 mm e interior de 8 mm. Las tuberías colocadas en paralelo, están separadas 160mm.

Por otro lado, en lo referente al módulo en su conjunto, está basado en los tradicionales paneles sandwich, con un panel de espuma rígida de poliuretano (PUR) o de poliisocianurato (PIR) que actúa como aislante. Las tuberías están colocadas en la cara exterior, terminando en juntas transversales que se conectan formando un intercambiador de calor paralelo. La longitud de los paneles es variable, no así el ancho que es de 1 m (57).

La idea de colocar las tuberías en la cara exterior, puede parecer a priori poco estética, pero esto está así diseñado para poder colocar posteriormente sobre ella una cubierta más aceptable desde el punto de vista arquitectónico.

En estudios experimentales, este sistema, no disponible en el mercado actualmente, se diseñó para proporcionar aire caliente y ACS por medio de un sistema de bomba de calor con una mezcla de alcohol-agua. El sistema se completa con los correspondientes tanques de almacenamiento.

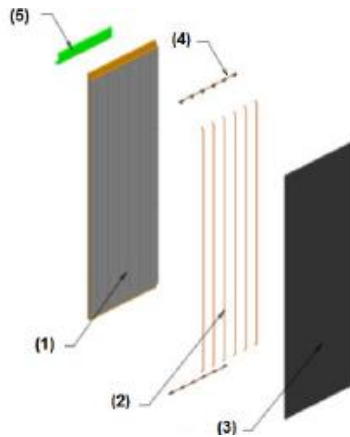


Ilustración 29 Despiece de un colector BASSE (58)

En su experimentación en el KUBIK de Tecnalia, se pudo comprobar que con este sistema unido a una bomba de calor, se pueden lograr COP de entre 4,8 y 5,5 en la producción de ACS y de entre 3,2 y 4,4 utilizándolo para aire caliente. Estos valores se consiguen para una captación de sol del 32,8% (58).

1.5.8.5 Colectores solares masivos

Los colectores solares masivos, se presentan como una posible solución a los grandes costes de inversión que suponen las fachadas de colectores solares, además de facilitar la integración arquitectónica al tratarse de fachadas de hormigón, un material tradicionalmente utilizado. Es un sistema que lleva estudiándose desde la crisis del petróleo en la década de los 70, y sin embargo, aún no existen muestras evidentes de su efectividad ni se ha conseguido su intrusión en el mercado.

Los colectores solares masivos, toman como absorbente un material como el hormigón en lugar de un componente metálico aplican métodos similares al suelo radiante a superficies verticales exteriores. El fluido de trabajo es agua o agua con salmuera, que circula por las tuberías incorporadas al absorbente que pueden ser metálicas o plásticas.

Uno de sus grandes atractivos, es la capacidad térmica que permite un importante almacenamiento de energía térmica, que posibilitaría disponer de ella incluso cuando no hubiera sol. Esta gran inercia térmica hace que el comportamiento sea radicalmente distinto de otros sistemas de colectores.

Otras de sus ventajas son su integridad estructural y la variabilidad de posibles formas, se le pueden aplicar las técnicas tradicionales de hormigón prefabricado para crear un sistema modular, los costes de inversión son muy bajos y no hay necesidad de marco.

Además, desde un punto de vista térmico, el hormigón es un material muy válido para aplicaciones solares ya que el hormigón alcanza aproximadamente el 60% de la capacidad calorífica volumétrica del agua (0,66 kWh/(m³·K)). Además, la conductividad térmica (0.02-0.05 W/(m·K)) es relativamente alta, así como su poder calorífico(≈1kJ/(kg·K)).

Una investigación, que no se tratará más en profundidad en este trabajo, que se está llevando a cabo con este tipo de materiales, con el objetivo de mejorar su capacidad de almacenaje es su combinación con materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés).

Algo que hay que tener muy en cuenta, y que es una de las grandes desventajas de este método es que su instalación puede causar cambios en las pérdidas de calor del edificio por la transmisión térmica y esto puede generar problemas de confort térmico para los habitantes.

El rendimiento exergético de este tipo de sistemas integrados en edificaciones, es de entorno al 32% y conectando este sistema a una bomba de calor, se obtienen COPs de aproximadamente 3,7 (59).

1.5.8.6 Proyecto RhOME

El proyecto *RhOME*, previamente mencionado, surge en este mismo contexto de superar las barreras existentes para integrar energías solares térmicas en los núcleos urbanos. Para ello, tras la identificación de las principales limitaciones existentes, se llevó a cabo un diseño bastante exitoso.

Los diseñadores decidieron colocar un panel de aluminio conectado a una bomba de calor para la producción de ACS. A dicho panel, en lugar de ser un recubrimiento de fachada como lo eran las investigaciones anteriores, se le dio la forma de una barandilla para el balcón de cada uno de los apartamentos garantizando el uso independiente de energía para cada uno.

La tecnología del panel, procedente de la industria frigorífica, está realizada mediante dos láminas de aluminio unidas entre sí, sobre las que se ha mecanizado el circuito hidráulico. Por dicho circuito fluye un gas refrigerante a temperaturas por debajo de los 30°C que puede expandirse. Mediante la bomba de calor, se logra energía térmica que se envía a un almacén para su posterior uso. (38)



Ilustración 30 Barandilla termodinámica del proyecto RhOME (35)

1.6 Análisis de alternativas

Aunque este trabajo pretende centrar su atención en el desarrollo de colectores solares térmicos no acristalados, se va a analizar el comportamiento de distintas alternativas, entre las que se incluyen geometrías con cristal.

1.6.1 Colector solar no acristalado

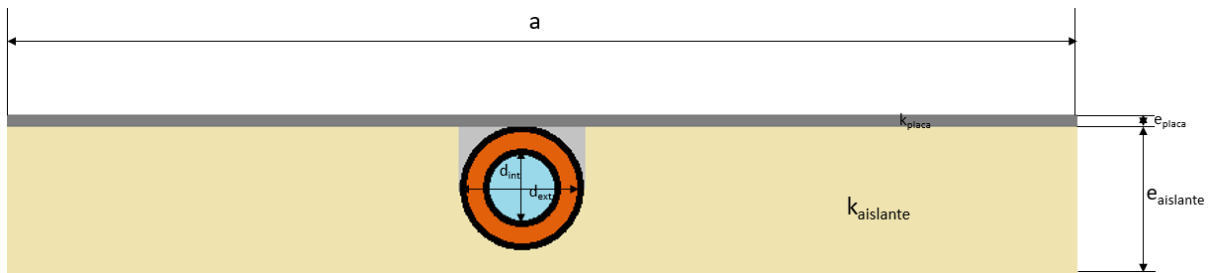


Ilustración 31 Esquema colector solar no acristalado

En este caso se dispone de un colector solar no acristalado compuesto por una placa absorbente, para la que se considerarán dos materiales: acero y aluminio, evaluándose distintos espesores de placa para cada uno de ellos. Soldada a esta placa, se encuentra una tubería de cobre con un diámetro exterior de 10 mm e interior de 8 mm, por la que circula un determinado caudal de agua. En el estudio que se realizará de esta geometría, se analizará también la influencia que puede tener la existencia o no de aislamiento cómo afecta la variación de la resistividad de este.

La principal ventaja de este tipo de sistemas es el precio. Se trata de una tecnología bastante asequible, sobre todo dependiendo del tipo de material que se utilice. En el caso de los colectores solares masivos, de los que se ha hablado previamente, el coste se encuentra entre los 4 y 6 €/m², mientras que un colector de absorbente metálico cuesta alrededor de 10 veces esto, entre 30 y 100 €/m², siendo aun así más asequible que otras tecnologías. (18)

Además, este tipo de colectores funciona bien para diferencias de temperatura no muy altas entre el fluido de trabajo y el colector, lo que les hace adecuados para su funcionamiento conjunto con sistemas de bomba de calor o DH.

Sin embargo, este sistema actualmente presenta la limitación de su mala apariencia estética que dificulta su aplicación. Adicionalmente, la pérdida de rendimiento a diferencias de temperatura elevadas debido al aumento de las pérdidas convectivas supone otro problema potencial.

1.6.2 Colector solar no acristalado con revestimiento

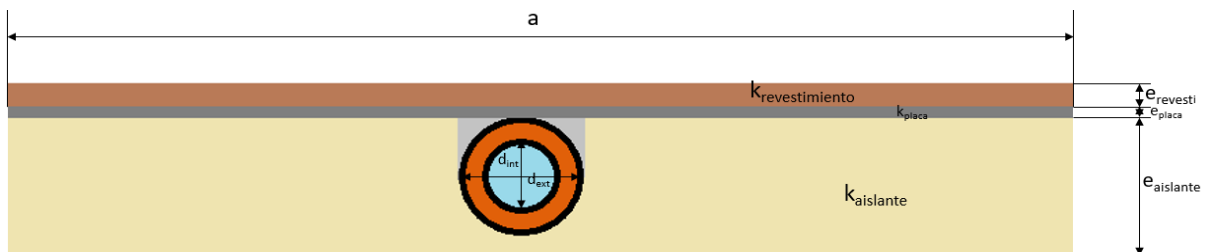


Ilustración 32 Esquema del colector solar no acristalado con revestimiento estético

Esta alternativa es básicamente igual que la anterior con la salvedad de que se ha añadido un recubrimiento estético de material pétreo para mejorar la apariencia de los colectores y facilitar su integración en la fachada. La placa pétreo tiene un espesor de 20 mm.

Respecto del modelo anterior presenta la ventaja de una mejor apariencia estética que facilitaría su integración en las fachadas de los edificios.

Sin embargo, esto también puede suponer una potencial desventaja al encarecer el colector con dicha placa. Además, habrá que considerar el impacto que la colocación de esta placa pueda suponer para el rendimiento, debido a las pérdidas por conducción que implica y es que los materiales pétreos son bastante malos conductores del calor.

1.6.3 Colector solar acristalado

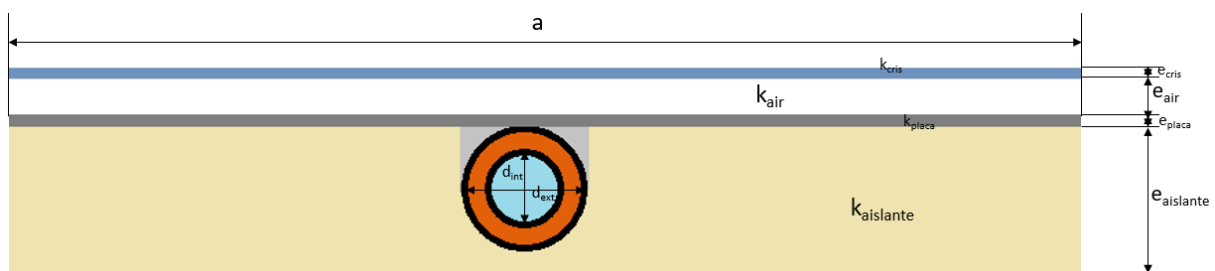


Ilustración 33 Esquema de colector solar acristalado

Los colectores solares acristalados consisten en una placa absorbente sobre la que se coloca un acristalamiento, dejando un espacio entre ambos que se llena con algún tipo de gas. En este caso se estudiará para cámara de aire. Soldado a la placa por el otro lado, existe un tubo de cobre por el interior del cual circula en fluido de trabajo, en este caso el agua. Se añade además un aislante para minimizar las pérdidas de calor por el trasdós. El cristal tiene un espesor de 4 mm y la cámara de aire 94 mm.

Esta tecnología tiene un coste algo más elevado, aproximadamente entre 4 y 20 €/m² adicionales sobre el precio de un colector no acristalado. Sin embargo, el acristalamiento supone una reducción de las pérdidas por convección que hace que aumente sustancialmente el rendimiento a mayores temperaturas, ampliándose el abanico de posibles aplicaciones.

1.6.4 Colector continuo no acristalado

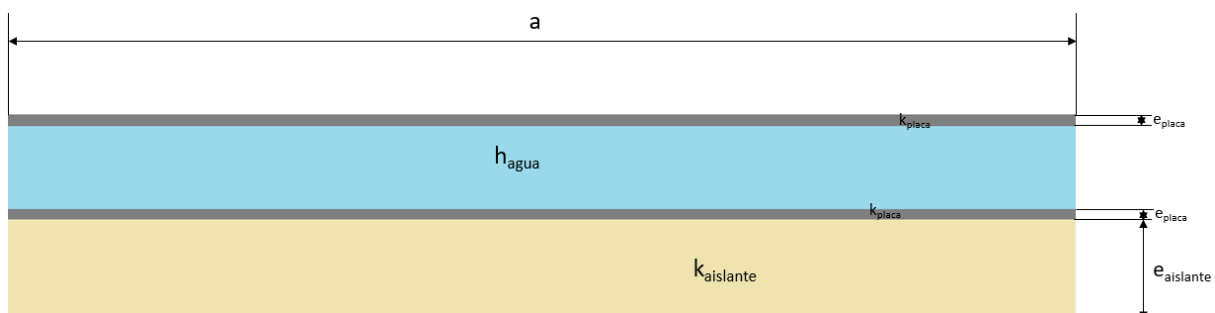


Ilustración 34 Colector continuo no acristalado

Los colectores continuos no acristalados, consisten en una placa absorbente directamente en contacto con el fluido de trabajo, de forma que a priori, se mejora la transferencia de calor al fluido. Por la parte trasera del colector se coloca un aislante que ayuda a minimizar las pérdidas.

Esta tecnología está basada en los intercambiadores de calor de la industria de la automoción, concretamente en los tubos de extrusión multi-puerto (MPE por sus siglas en inglés). Se trata de unos tubos planos con múltiples canales de pequeño tamaño a lo largo de los mismos. La geometría plana de los tubos MPE supone un ventajoso desarrollo de la capa exterior que hace que mejore la transferencia de calor. El material de estos tubos tiene que tener buena resistencia a presiones elevadas, así como a la fatiga y la corrosión. (60)

1.6.5 Colector continuo revestido

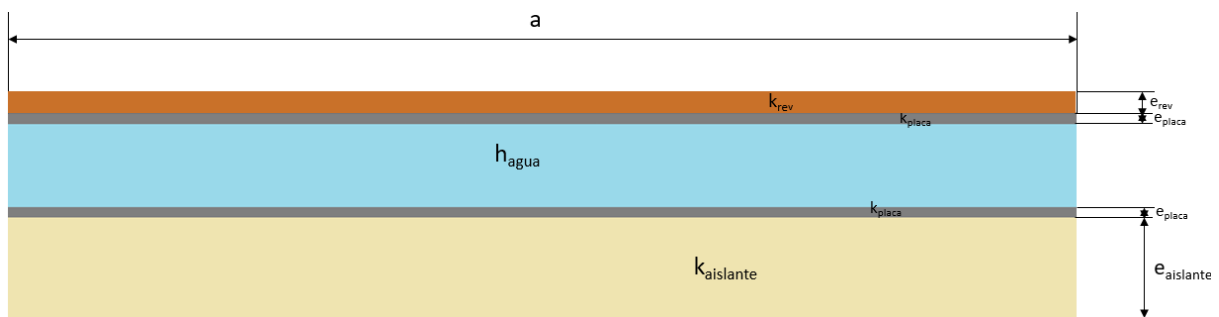


Ilustración 35 Colector solar continuo revestido

Este modelo es muy similar al anterior, pero en este caso se le ha añadido un revestimiento que puede ser de material cerámico o pétreo que aunque puede ser ligeramente perjudicial para el rendimiento, facilita notablemente la integración en fachada al mejorar la apariencia estética del colector.

1.6.6 Colector continuo acristalado (SAVOSOLAR®)

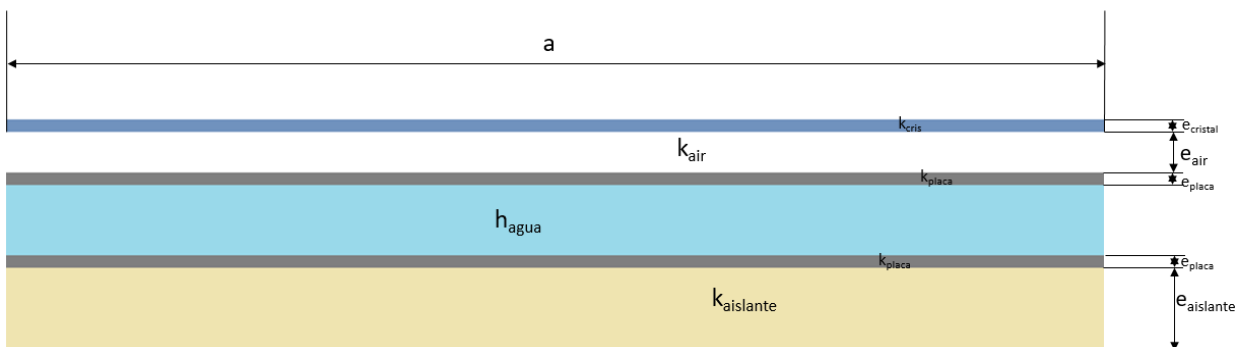


Ilustración 36 Colector solar continuo acristalado

Se trata de un modelo con las mismas características que el anterior al que además se añade una cubierta acristalada manteniendo una cámara de gas entre el acristalamiento y la placa absorbente, que en este caso se rellenará de aire.

Al igual que sucedía antes, la adición de la cubierta acristalada supondrá una disminución de pérdidas convectivas, así como un incremento en los costes del colector.

1.7 Análisis de riesgos

Realizar un correcto análisis de riesgos es vital para lograr un proyecto exitoso ya que facilita que se responda de la manera adecuada en caso de que se presenta alguno de los riesgos identificados.

1.7.1 Trabajo de fin de Máster

1.7.1.1 Análisis DAFO

Una herramienta de gran utilidad a la hora de analizar los riesgos a los que se va a enfrentar el proyecto es realizar un análisis DAFO del mismo de forma que se identifiquen los eventos que vayan a afectar al proyecto para así diseñar estrategias que permitan el máximo aprovechamiento de las oportunidades que se presenten así como minimizar el efecto de los eventos negativos.

Tabla 2 Análisis DAFO del TFM

| DEBILIDADES | FORTALEZAS |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Proyecto íntegramente informático• Complejidad de cálculos precisos | <ul style="list-style-type: none">• Software sencillo• Existencia de datos experimentales |
| AMENAZAS | OPORTUNIDADES |
| <ul style="list-style-type: none">• Fallo informático• Falta de precisión en los resultados | <ul style="list-style-type: none">• Posibilidad de programar múltiples modelos• Posibilidad de analizar la influencia de múltiples variables• Validación de modelos |

1.7.1.2 Registro de riesgos

1.7.1.2.1 Pérdida de datos

Al tratarse de un proyecto íntegramente informático uno de los posibles riesgos a los que se hace frente es a la posibilidad de que ocurra una pérdida de los resultados que se van obteniendo. Esto puede deberse a múltiples causas: fallo del equipo, desaparición, infección por un virus.

Una pérdida de datos depende de la altura del proyecto a la que se dé puede ser grave porque supondría graves retrasos que podrían suponer que el proyecto no se entregue a tiempo.

Plan de respuesta:

Para reducir el impacto de este posible riesgo, se dispondrá de múltiples copias del proyecto en diferentes lugares además del equipo: USB, la nube...

1.7.1.2.2 Fallos en el programa

Se pueden dar dos tipos de fallos principalmente en el programa: fallos de compilación y resultados incorrectos.

Los fallos de compilación, aunque es altamente probable que ocurran a lo largo del proyecto en múltiples ocasiones, lo habitual con este tipo de inconvenientes es que se puedan solucionar fácilmente con una revisión detallada del código o mediante pequeñas modificaciones en el mismo que lo optimicen.

Sin embargo, el caso de los resultados incorrectos es más peliagudo ya que algunas de las geometrías y cálculos que se van a analizar pese a que a priori parecen muy sencillos, pueden presentar ciertas dificultades que hagan que los resultados sean incorrectos. Este fallo presenta un mayor inconveniente puesto que es posible que no se detecte el fallo hasta que se llegue a la fase de validación de los resultados. Si en ese momento las discrepancias son suficientemente grandes como para no poder corregir el modelo mediante el ajuste de ciertos parámetros, habría que volver a comenzar y esto supondría retrasos muy graves.

Plan de respuesta:

Los fallos de compilación no tendrán un plan de contingencia específico debido a que se considera que su impacto en el proyecto no debería de ser muy grande.

Sin embargo, para los cálculos incorrectos, básicamente la estrategia consistirá en evitar que ocurra mediante una documentación exhaustiva y un planteamiento de los casos revisado en múltiples ocasiones, revisando que los resultados obtenidos para diferentes valores de varios parámetros siempre sean coherentes. De esta manera se espera que sea altamente improbable obtener resultados incorrectos.

1.7.2 Desarrollo experimental

1.7.2.1 Análisis DAFO

Tabla 3 Análisis DAFO del desarrollo experimental

| DEBILIDADES | FORTALEZAS |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Dependencia de distribuidores externos • Dependencia de condiciones climáticas • Diseños a partir de simulaciones | <ul style="list-style-type: none"> • Infraestructuras y equipamiento • Equipo de excelencia |
| AMENAZAS | OPORTUNIDADES |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Retrasos en entregas• Rango de datos ambientales limitado | <ul style="list-style-type: none">• Uso de Kubik |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|

1.7.2.2 Registro de riesgos

1.7.2.2.1 Problemas con los distribuidores

Para la realización de experimentos con colectores solares no acristalados para integrar en fachada, se contrata a una empresa especializada la fabricación del colector. La subcontratación de tareas siempre implica ciertos riesgos puesto que una parte del proyecto deja de depender directamente del equipo del proyecto. Algunos de los problemas que se pueden dar derivan principalmente de retrasos en las entregas o defectos de fabricación.

Riesgos similares se pueden dar con los sensores que se adquirirán de distribuidores especializados.

Plan de respuesta:

Se escalará este riesgo, lo cual quiere decir que se hará a las empresas distribuidoras responsables directas mediante constancia en el contrato de garantizar que todos los componentes se entregan a tiempo y en perfectas condiciones.

Para garantizar además que todos los componentes cumplen con las especificaciones necesarias, se entregará a las empresas implicadas detallados pliegos de condiciones.

1.7.2.2.2 Fallos de instalación

En la fase de instalación del prototipo se han encontrado múltiples factores que será conveniente vigilar para asegurar un proyecto exitoso. Algunos de los mismos incluyen montajes incorrectos; daño de sensores, lo cual es probable debido a la sensibilidad de algunos equipos y condiciones atmosféricas adversas que exijan retrasar la instalación.

Plan de respuesta:

Se asume la existencia de riesgo de climatología adversa y los retrasos que pueda ocasionar, puesto que es poco probable que sean realmente relevantes y los costes asociados a controlarlo como un aumento de la plantilla se considera que no serían rentables. Solo se tomarán este tipo de medidas caso de que el retraso realmente vaya a condicionar el éxito del resto del proyecto.

En lo referente al daño de sensores, se comprarán repuestos de algunos de los componentes que más probablemente pueden ser dañados en montaje o durante la fase de experimentación para estar preparados en caso de ser necesario.

Se escalan los riesgos derivados de montajes erróneos a la compañía encargada de hacerlo.

1.7.2.2.3 Problemas en la fase de experimentación

Durante esta fase puede haber problemas tales como sensores mal calibrados o climatología adversa que no permita recabar todos los datos necesarios.

Plan de respuesta:

Como se ha dicho antes, frente a sensores mal calibrados o defectuosos, se dispondrá de repuestos de estos.

En el caso de climatología adversa se intentará replicar las condiciones de simulación buscadas haciendo uso de distintos equipos que puedan simular varias condiciones climáticas.

1.7.3 Matriz de riesgos

Tabla 4 Matriz de riesgos

| | | PROBABILIDAD | | | | |
|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|--------------|-------------------|
| | | RARO | POCO PROBABLE | POSIBLE | MUY PROBABLE | CASI SEGURO |
| CONSECUENCIAS | DESPRECIABLES | | | | | • Error de código |
| | MENORES | | • Componentes defectuosos • Sensores mal calibrados | • Retrasos distribuidores | | |
| | MODERADAS | • Instalación incorrecta | | | | |
| | MAYORES | • Datos insuficientes | • Resultados erróneos | | | |
| | CATASTRÓFICAS | | • Pérdida de datos | | | |

1.8 Selección y descripción de la solución propuesta

Para el desarrollo completo de este trabajo se van a simular mediante el programa RStudio los modelos que se han presentado en el apartado 1.6.

A todos estos modelos se les aplicará un análisis de sensibilidad a diferentes parámetros tanto geométricos como ambientales para conocer cómo afecta la variación de los mismos al rendimiento del colector y a partir de ahí discernir cuál es el tipo de colector más adecuado para cada tipo de aplicación y cuáles son los parámetros geométricos más convenientes para su diseño.

El análisis se basará en el primer principio de la termodinámica aplicado a cada uno de los modelos de colector que se han presentado anteriormente. De forma genérica, la ecuación de transmisión de calor en un colector puede expresarse como:

$$A \cdot I \cdot \alpha = \dot{Q}_u + \dot{Q}_L + \dot{Q}_S \quad (1)$$

Esta ecuación se particularizará para cada uno de los casos de forma que sea posible obtener modelos matemáticos que sean una buena aproximación del funcionamiento real de estos colectores.

Los parámetros ambientales cuya variación va a estudiarse son:

- La radiación global (I)
- La temperatura de entrada de agua al colector (T_{in})
- La temperatura ambiental (T_a)

Los parámetros ambientales serán:

- La anchura del colector (a)
- El material de la placa absorbente
- El espesor de la placa absorbente (e_p)
- El material aislante
- El espesor del aislante (e_{ais})
- El caudal de agua (v_{agua})

2 Metodología seguida

2.1 Descripción de tareas, fases, equipos y procedimientos

Hito 1: Inicio del Proyecto

El proyecto de inicia con una primera reunión el 9 de octubre entre el responsable en Tecnalía y la estudiante, donde se explica brevemente en qué consiste el proyecto, se establecen objetivos y se aporta información para la familiarización con el tema.

2.1.1 Elaboración del estado del arte

Tabla 5 Resumen fase elaboración estado del arte

| Duración | Recursos |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 54 días | <ul style="list-style-type: none">• 1 ingeniero junior• 1 ordenador |

Tarea 2.1: Recopilación de la documentación (Duración 8 días)

Para conocer el estado actual del desarrollo tecnológico en este ámbito, se hace una recopilación bibliográfica en la que se incluyen libros, artículos y sitios web.

Tarea 2.2: Lectura y síntesis de la información (Duración 13 días)

Se realiza una lectura diagonal de toda la información recopilada para extraer la más relevante, a partir de la cual se sintetizan las ideas que se considera necesario hacer constar en el estado del arte como las distintas tecnologías de colectores solares que existen, diferentes métodos de aplicación y las investigaciones actuales más notables en lo referente a colectores solares no acristalados para integrar en fachada.

Tarea 2.3: Redacción del primer borrador (Duración 12 días)

Redacción de un primer borrador del estado del arte donde se incluirá toda la información que se ha considerado importante de la obtenida en la tarea anterior.

Tarea 2.4: Correcciones (Duración 23 días)

Tras enviar el primer borrador, se procede a la rectificación del mismo a partir de las notas que el tutor haya considerado necesarias para disponer de una mejor visión del tema.

Hito 2: Entrega del estado del arte

Se concluye la fase con un envío del estado del arte corregido para su aprobación por parte de los tutores, de manera que se pueda extraer del mismo un conocimiento básico para tener una visión global del tema que facilite la comprensión del trabajo a personas no familiarizadas con el mismo.

2.1.2 Programación de modelos

Tabla 6 Resumen fase programación de modelos

| Duración | Recursos |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 127 días | <ul style="list-style-type: none">• 1 ingeniero junior• 1 ingeniero senior• Ordenador• Software RStudio |

Tarea 3.1: Familiarización con RStudio (Duración 33 días)

Lo primero que se requiere para la realización del trabajo es en sí una vez que se está familiarizado con el contexto tecnológico en el que se desarrolla, es conocer el software que se va a utilizar.

En este caso, el software a utilizar es el programa RStudio que es un entorno de desarrollo integrado (IDE por sus siglas en inglés) para R. Se trata de un lenguaje para computación estadística y gráficos desarrollado como proyecto de GNU por lo que se trata de software libre. Una de las principales ventajas de R es el amplio rango de técnicas estadísticas y gráficas de las que dispone que permiten generar gráficas bien diseñadas con calidad de publicación. (61)

Tarea 3.2: Modelización de la geometría 1 (Duración 9 días)

Se han presentado ya en el apartado de análisis de alternativas las diferentes geometrías que se van a modelizar en este trabajo. La primera de ellas, la geometría 1, es la más sencilla de todas ellas al tratarse de un colector no acristalado simple. En un primer momento, se realizará un modelo muy sencillo de la transmisión de calor en el mismo valiéndose de múltiples simplificaciones que se explicarán más adelante.

Tarea 3.3: Programación del primer nodo (Duración 5 días)

Comprendidos los mecanismos de transmisión de calor que entran en juego, se procede a la programación de los cálculos en el primer nodo mediante el software R.

Tarea 3.4: Correcciones (Duración 15 días)

Se compararán los resultados con los obtenidos mediante otros métodos para garantizar que la programación ha sido correcta. Además, se analiza el resultado para varios valores diferentes de los parámetros para comprobar su coherencia para un rango amplio de parámetros. Posteriormente se recurre al juicio experto del tutor para detectar errores que puedan seguir existiendo. Se solucionarán los problemas detectados.

Tarea 3.5: Extender el cálculo a todo el colector (Duración 12 días)

Comprobado que los cálculos anteriores son correctos, se procede a la programación del bucle que haga que se extienda el cálculo a todos los nodos.

Tarea 3.6: Correcciones (Duración 6 días)

Revisión del programa hasta el momento y corrección de fallos que se detecten.

Tarea 3.7: Análisis de la evolución de los parámetros en los nodos (Duración 9 días)

Se elaboran tablas y gráficas con la evolución de parámetros a lo largo del colector para la comprobación del sentido lógico de los mismos.

Tarea 3.8: Barrido de datos ambientales (Duración 5 días)

Se elabora una base de datos de diferentes combinaciones de parámetros ambientales para comprobar su impacto sobre el colector. Se modifica el programa para que realice el barrido de datos y obtener gráficas.

Tarea 3.9: Barrido de datos geométricos (Duración 5 días)

Se elabora una base de datos de diferentes combinaciones de parámetros geométricos para comprobar su influencia en el diseño del colector. Se modifica el programa para realizar el barrido de datos y obtener gráficas.

Tarea 3.10: Adaptación de los cálculos al caso 2 (Duración 5 días)

Se realiza el modelo de transmisión de calor para la geometría 2 y se modifica el programa para realizar estos cálculos.

Tarea 3.11: Informe de simulación caso 1 (Duración 2 días)

Se realiza un informe de la primera geometría en el que consten las ecuaciones necesarias, los parámetros utilizados y los resultados obtenidos.

Tarea 3.12: Informe de simulación caso 2 (Duración 2 días)

Se realiza un informe de la segunda geometría en el que consten las ecuaciones necesarias, los parámetros utilizados y los resultados obtenidos.

Tarea 3.13: Optimización programa (Duración 2 días)

Se realizan pequeñas modificaciones al programa que permitan su ejecución a mayor velocidad para permitir una gestión más rápida de los datos.

Tarea 3.14: Adaptación de los cálculos al caso 3 (Duración 6 días)

Se realiza el modelo de transmisión de calor para la geometría 3 y se modifica el programa para realizar estos cálculos.

Tarea 3.15: Informe de simulación caso 3 (Duración 2 días)

Se realiza un informe de la tercera geometría en el que consten las ecuaciones necesarias, los parámetros utilizados y los resultados obtenidos.

Tarea 3.16: Adaptación de los cálculos al caso 4 (Duración 7 días)

Se realiza el modelo de transmisión de calor para la geometría 4 y se modifica el programa para realizar estos cálculos.

Tarea 3.17: Informe de simulación caso 4 (Duración 2 días)

Se realiza un informe de la cuarta geometría en el que consten las ecuaciones necesarias, los parámetros utilizados y los resultados obtenidos.

Tarea 3.18: Adaptación de los cálculos al caso 5 (Duración 6 días)

Se realiza el modelo de transmisión de calor para la geometría 5 y se modifica el programa para realizar estos cálculos.

Tarea 3.19: Informe de simulación caso 5 (Duración 2 días)

Se realiza un informe de la quinta geometría en el que consten las ecuaciones necesarias, los parámetros utilizados y los resultados obtenidos.

Tarea 3.20: Refinar modelos (Duración 5 días)

Habiéndose familiarizado ya con múltiples geometrías diferentes y teniendo modelos bastante fiables de las mismas, llegados a este punto se procede a la eliminación de algunas de las simplificaciones para la realización de unos cálculos más complejos con los que lograr resultados más precisos y mejor ajustados.

Tarea 3.21: Verificación de los modelos con datos experimentales (Duración 5 días)

A partir de datos experimentales aportados por Tecnalia, se comprueba que efectivamente los modelos realizados, además de ser resultados coherentes, dan resultados que se corresponden con la realidad

2.1.3 Redacción del TFM

| Duración | Recursos |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 121 días | <ul style="list-style-type: none">• 1 ingeniero junior• Ordenador• Paquete office• Microsoft Project |

Tarea 4.1: Memoria (Duración 50 días)

Se redacta el apartado de la memoria donde se establecen los objetivos, el alcance del proyecto, sus beneficios, el estado del arte, contexto en el que se desarrolla el proyecto, riesgos, análisis de alternativas etcétera.

Tarea 4.2: Cálculos (Duración 15 días)

Se realiza una explicación detallada de los cálculos que se han realizado, las hipótesis utilizadas, los resultados que se han obtenido, procurando obtener conclusiones relevantes de los mismos y constarán las gráficas obtenidas que se considere que son más relevantes.

Tarea 4.3 Planificación (Duración 5 días)

Se realiza la planificación del desarrollo experimental de un prototipo.

Tarea 4.4: Presupuesto y rentabilidad (Duración 15 días)

Se presupuesta el coste de una instalación experimental y se analiza la rentabilidad de la instalación de este tipo de fachadas frente a una fachada tradicional.

Tarea 4.5: Correcciones (Duración 13 días)

Se realizan correcciones y cambios atendiendo a los criterios del tutor responsable.

Hito 3: Entrega del TFM

Se realiza la entrega del trabajo de fin de máster en la fecha correspondiente con el visto bueno del tutor.

2.2 Diagrama de Gantt

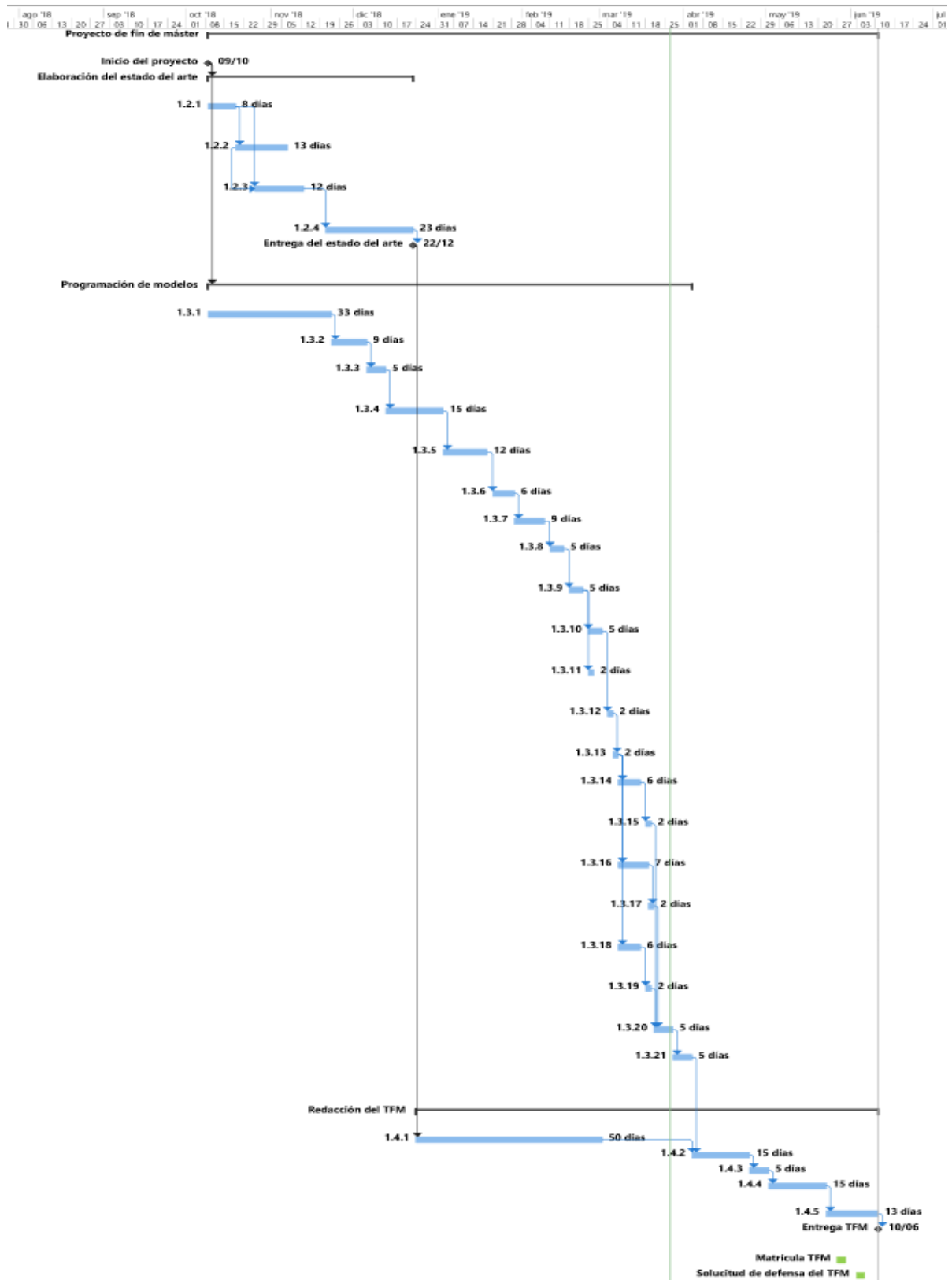


Ilustración 37 Diagrama de Gantt del TFM

2.3 Cálculos

Para la realización de los cálculos, se tendrá en cuenta el primer principio de la termodinámica aplicado a cada una de las geometrías previamente mencionadas. Aunque a priori puede parecer un balance sencillo, para la resolución precisa de los problemas, resulta más complejo de lo que aparenta.

Por ello, lo que se va a realizar a continuación es un desarrollo más detallado de las ecuaciones para el caso del colector solar no acristalado, y posteriormente se expondrán las variaciones que será necesario realizar para el resto de los casos.

2.3.1 Colector solar térmico no acristalado

Con el fin de facilitar la comprensión de los cálculos, se dividirá el colector en varias secciones y se aplicará en primer principio de la termodinámica a cada una de ellas.

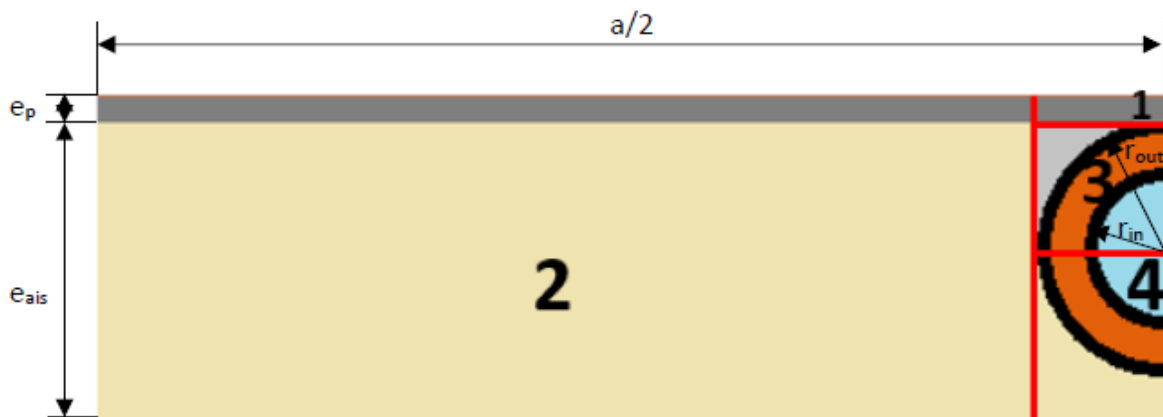


Ilustración 38 Secciones aplicadas al colector

En este caso se aplica el primer principio de la termodinámica en términos de potencia a un sistema cerrado que tendrá la siguiente forma:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (2)$$

Como se trabaja en condiciones estacionarias y no hay ningún aporte de trabajo, la expresión puede reducirse a:

$$\dot{Q} = 0 \quad (3)$$

De forma que se obtienen las siguientes ecuaciones en cada sección:

$$\sum \dot{Q}_1 = 0 = \dot{Q}_{SOL\ 1} + \dot{Q}_{2-1} - \dot{Q}_{1-3} \quad (4)$$

$$\sum \dot{Q}_2 = 0 = \dot{Q}_{SOL\ 2} - \dot{Q}_{2-1} - \dot{Q}_{2-3} - \dot{Q}_{2-4} - \dot{Q}_{tras\ 2} \quad (5)$$

$$\sum \dot{Q}_3 = 0 = \dot{Q}_{1-3} - \dot{Q}_{3-4} - \dot{Q}_{3-agua} \quad (6)$$

$$\sum \dot{Q}_4 = 0 = \dot{Q}_{3-4} - \dot{Q}_{4-agua} - \dot{Q}_{tras\ 4} \quad (7)$$

El siguiente paso, una vez que se conocen estos balances, será ir despejando y resolviendo cada uno de ellos de forma que al final se obtenga una única ecuación a partir de la cual realizar los cálculos de transmisión de calor globales.

El primer balance que se va a resolver es el correspondiente a la ecuación (7). Este es un balance es realmente sencillo de resolver si se supone que la temperatura se distribuye de forma uniforme por todo el tubo, lo cual es una aproximación suficientemente buena para el caso de los materiales que conducen bien el calor como los metales. Sin embargo, no es así para materiales como los plásticos que se utilizan también en algunos modelos de colectores. Por ello se ha considerado como una aproximación más realista la resolución como aleta.



Ilustración 39 Sección 4 como aleta

Para esto, se toma un elemento diferencial en la sección que se está calculando y se plantea el balance de energía:

$$\dot{Q}_{cond\ x} = \dot{Q}_{cond\ x+\Delta x} + \dot{Q}_{agua} + \dot{Q}_{tras} \quad (8)$$

Donde:

$$\dot{Q}_{agua} = l \cdot dx \cdot h_{agua} \cdot (T_T - T_{agua}) \quad (9)$$

Y aplicando e método de la resistencia eléctrica equivalente:

$$\dot{Q}_{tras} = l \cdot dx \cdot h_{tras} \cdot (T_{tras} - T_a) = l \cdot dx \cdot \frac{(T_T - T_a)}{R_4} \quad (10)$$

Siendo:

$$R_4 = \frac{1}{h_{tras}} + \frac{\left((e_{ais} - d_{out}) + (r_{out} - \sqrt{r_{out}^2 - x^2}) \right) / d_{out} + \frac{\ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}{\pi \cdot k_{tub}}}{k_{ais}} \quad (11)$$

Se plantea la ecuación diferencial con estos datos y se obtiene:

$$\dot{Q}_{3-4} = l \cdot \int_{-r_m}^{r_m} \left(\frac{(T_T - T_a)}{\left((e_{ais} - d_{out}) + (r_{out} - \sqrt{r_{out}^2 - x^2}) \right) / d_{out} + \frac{\ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}{\pi \cdot k_{tub}}} + h_{agua} \cdot (T_T - T_{agua}) \right) dx \quad (12)$$

La integral se deja simplemente indicada puesto que será el propio software R el encargado de la resolución de la misma mediante el comando *integrate(f,lower,upper)*.

Conocido \dot{Q}_{3-4} , que será el calor de la sección 3 que pasa a la sección 4 del colector, se pasa al balance de energía (6) donde se despejará \dot{Q}_{1-3} , definido como el calor de la sección 1 que pasa a 3. De manera que resulta:

$$\dot{Q}_{1-3} = l \cdot \int_{-r_m}^{r_m} \left(\frac{(T_T - T_a)}{\left((e_{ais} - d_{out}) + (r_{out} - \sqrt{r_{out}^2 - x^2}) \right) / d_{out} + \frac{\ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}{\pi \cdot k_{tub}}} + h_{agua} \cdot (T_T - T_{agua}) \right) dx + \quad (13)$$

$$h_{agua} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{in}}{2} \cdot l \right) \cdot (T_T - T_{agua})$$

Siendo

$$\dot{Q}_{3-agua} = h_{agua} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{in}}{2} \cdot l \right) \cdot (T_T - T_{agua}) \quad (14)$$

el calor que se transmite al agua desde la sección 3.

Para la resolución del balance (5), en el caso del calor \dot{Q}_{2-1} el desarrollo vuelve a hacerse como aleta. Por sencillez, en esta ocasión no se plantea aquí el desarrollo completo de las ecuaciones de transmisión de calor en la aleta que en esta ocasión se ha obtenido de (59) obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{2-1} = (a - d_{out}) \cdot l \cdot (I \cdot \alpha - U_L \cdot (T_P - T_a)) \cdot \frac{\tanh m \cdot \frac{a-d_{out}}{2}}{m \cdot \frac{a-d_{out}}{2}} \quad (15)$$

La transmitancia térmica total (U_L) puede ser calculada mediante las siguientes ecuaciones:

$$U_L = U_b + U_T \quad (16)$$

$$U_b = \frac{1}{\frac{e_p}{k_p} + \frac{e_{ais}}{k_{ais}} + \frac{1}{h_{tras}}} \quad (17)$$

$$U_t = h_{ext} + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \frac{(T_p^4 - T_a^4)}{(T_p - T_a)} \quad (18)$$

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_p \cdot e_p}} \quad (19)$$

Conocido todo esto, se sustituyen en (4) todos los valores además del valor de \dot{Q}_{SOL1} , que es el calor que se absorbe en 1 procedente del sol, descontando las pérdidas y será, por lo tanto:

$$\dot{Q}_{SOL1} = I \cdot \alpha \cdot d_{out} \cdot l - h_{ext} \cdot d_{out} \cdot l \cdot (T_P - T_a) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot d_{out} \cdot l \cdot ((T_P + 273)^4 - (T_a + 273)^4) \quad (20)$$

Y el balance global:

$$d_{out} \cdot l \cdot (I \cdot \alpha - h_{ext} \cdot (T_P - T_a) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot ((T_P + 273)^4 - (T_a + 273)^4)) + (a - d_{out}) \cdot (I \cdot \alpha - U_L \cdot (T_P - T_a)) \cdot \frac{\tanh m \cdot \frac{a-d_{out}}{2}}{m \cdot \frac{a-d_{out}}{2}} = h_{agua} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{in}}{2} \cdot l\right) \cdot (T_T - T_{agua}) + l \cdot \int_{-r_m}^{r_m} \left(\frac{(T_T - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{tras}} + \frac{(e_{ais} - d_{out}) + (r_{out} - \sqrt{r_{out}^2 - x^2})}{k_{ais}}\right) / d_{out} + \frac{\ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}{\pi \cdot k_{tub}}} + h_{agua} \cdot (T_T - T_{agua}) \right) dx \quad (21)$$

Llegados a este punto hay una única ecuación con dos incógnitas (T_P y T_T) entre las que habrá que establecer una relación, de forma que se obtenga otra ecuación linealmente independiente para tener un sistema compatible determinado, para lo cual se recurre al circuito térmico y se establece la equivalencia.

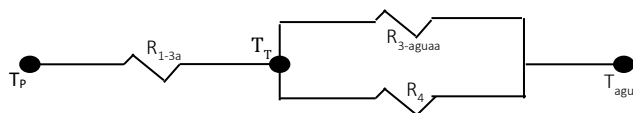


Ilustración 40 Esquema de resistividades térmicas

$$\frac{(T_P - T_{agua})}{R_{1-3} + \frac{1}{\frac{1}{R_{agua}} + \frac{1}{R_4}}} = \frac{(T_P - T_T)}{R_{1-3}} + \frac{(T_T - T_{agua})}{\frac{1}{\frac{1}{R_{agua}} + \frac{1}{R_4}}} \quad (22)$$

Con las expresiones que se tienen hasta este momento, el problema está globalmente definido, de forma que solo queda definir las variables intermedias. Estas constituyen las siguientes 13 expresiones:

$$h_{ext} = 4 + 4 \cdot v \quad (23)$$

$$h_{agua} = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} \cdot \rho \cdot (c_e \cdot 10^3) \cdot c_{agua} \quad (24)$$

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (25)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot c_{agua} \cdot l}{\mu} \quad (26)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot (c_e \cdot 10^3)}{k_{agua}} \quad (27)$$

$$c_{agua} = \frac{v_{agua}}{\frac{\pi \cdot d_{in}^2}{4}} \quad (28)$$

$$R_{1-3} = \frac{e_p}{k_p \cdot d_{out}} + \frac{e_{sol}}{k_{sol} \cdot d_{out}} + \frac{\ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}{k_{tub} \cdot \pi} \quad (29)$$

$$e_{sol} = \int_{-r_{out}}^{r_{out}} \frac{r_{out} - \sqrt{r_{out}^2 - x^2}}{d_{out}} dx \quad (30)$$

$$R_{agua} = \frac{1}{h_{agua} \cdot (\pi \cdot r_{in})} \quad (31)$$

$$T_{agua} = \frac{T_{agua in} + T_{agua out}}{2} \quad (32)$$

$$T_{agua out} = T_{agua in} + \Delta T \quad (33)$$

$$\Delta T = \frac{q_{agua}/1000}{m \cdot c_e} \quad (34)$$

$$\dot{q}_{agua} = \frac{(T_T - T_{agua}) \cdot l}{R_{agua}} \quad (35)$$

El objetivo final de realizar estos cálculos es conocer el rendimiento del colector, por lo tanto, es necesario aclarar cómo va a definirse este. Se calculan dos rendimientos.

- El rendimiento por nodo:

$$\eta_{nodo} = \frac{\dot{q}_{agua}}{a \cdot l \cdot I \cdot \alpha} \quad (36)$$

- El rendimiento global de la placa:

$$\eta_{nodo} = \frac{\dot{q}_{agua\ total}}{(a \cdot L) \cdot I \cdot \alpha} \quad (37)$$

Con todos los parámetros a calcular definidos, solo queda dar a conocer el desarrollo del estudio que se va a realizar para cada modelo de colector.

Se puede dividir el estudio en cuatro partes:

- La primera consiste en el estudio de un caso general en el que, para unas condiciones ambientales dadas y una geometría de dimensiones concretas, se estudia la evolución a lo largo del colector del rendimiento, el calor transmitido al agua y la variación de las temperaturas de entrada, salida y media en cada uno de los nodos que se definen.
- El segundo estudio, implica la construcción de una base de datos en la que se generan distintos casos de condiciones ambientales, variando:
 - Temperatura ambiental (T_a).
 - Temperatura de entrada de agua al colector (T_{in}).
 - Irradiancia (I).

Realizando posteriormente un barrido de datos con todos estos casos sobre una geometría concreta, de manera que se pueda comprobar la influencia de los mismos y se obtenga la ecuación característica de dicha geometría.

- El tercer estudio, consiste en calcular para unas condiciones ambientales dadas, la influencia que tiene variar distintos parámetros geométricos sobre el rendimiento global. En este caso se estudian:
 - El ancho del colector (a)
 - El material absorbente (k_p)
 - El espesor de la placa absorbente (e_p)
 - El material aislante (k_{ais})
 - El espesor del aislante (e_{ais})
 - El caudal de agua (v_{agua})
 - El material del tubo (k_t)
- Finalmente, se realiza un estudio conjunto de la influencia de la variación de los parámetros

ambientales y geométricos en los que se obtienen las rectas de operación de distintas geometrías del colector.

A continuación, se presentan los valores de los parámetros que se van a estudiar:

Tabla 7 Parámetros fijados para el ensayo

| Parámetro | Unidad | Valor |
|------------|---------------------|--------|
| α | - | 0,85 |
| l | cm | 10 |
| d_{in} | mm | 8 |
| d_{out} | mm | 10 |
| h_{tras} | W/m ² °C | 7 |
| ρ | kg/m ³ | 999,7 |
| c_e | kJ/kg | 4,188 |
| μ | kg/m·s | 0,0014 |

Tabla 8 Parámetros de sensibilidad

| Parámetro | Unidad | Mín. | Máx. | Resolución |
|-------------------------|------------------|-------|-------|------------|
| Condiciones Ambientales | | | | |
| I | W/m ² | 100 | 800 | 50 |
| T_a | °C | -10 | 15 | 1 |
| T_{aguain} | °C | -10 | 40 | 2,5 |
| Parámetros Geométricos | | | | |
| a | m | 0,05 | 0,3 | 0,025 |
| L | m | 2 | 20 | - |
| v_{agua} | l/h | 10 | 100 | 10 |
| e_{ais} | mm | 0 | 300 | 50 |
| k_{ais} | W/m°C | 0,025 | 0,045 | 0,005 |

Tabla 9 Parámetros de sensibilidad de la placa

| Parámetro | Unidad | Valor | |
|-------------|--------|----------|-------|
| Material | | Aluminio | Acero |
| k_{placa} | W/m°C | 237 | 50 |
| ϵ | - | 0,07 | 0,8 |
| e_{placa} | mm | Min | 1 |
| | | Max | 3 |
| | | Resol. | 1 |

2.3.2 Colector solar no acristalado con revestimiento

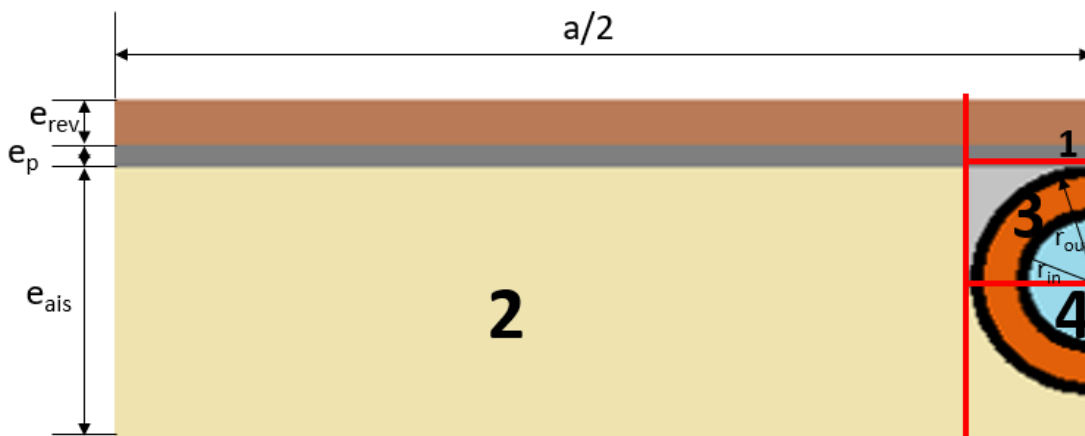


Ilustración 41 Secciones aplicadas al colector caso 2

Para esta geometría, los cálculos son prácticamente los mismos que en el caso anterior, pero esta vez habrá que añadir un término más que representa la conductividad de calor a través del revestimiento, resultando el siguiente esquema eléctrico equivalente:

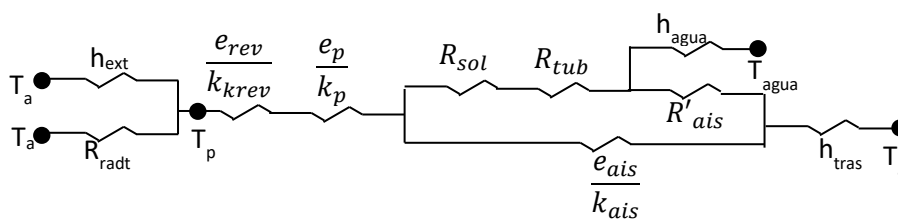


Ilustración 42 Esquema eléctrico equivalente caso 2

Luego, siguiendo un razonamiento análogo al del caso anterior en esta ocasión se tiene que:

$$U_b = \frac{1}{\frac{e_p}{k_p} + \frac{e_{ais}}{k_{ais}} + \frac{1}{h_{tras}} + \frac{e_{rev}}{k_{rev}}} \quad (38)$$

$$R_{1-3} = \frac{e_{rev}}{k_{rev} \cdot d_{out}} + \frac{e_p}{k_p \cdot d_{out}} + \frac{e_{sol}}{k_{sol} \cdot d_{out}} + \frac{\ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}{k_{tub} \cdot \pi} \quad (39)$$

En la tabla siguiente se recogen los valores de los nuevos parámetros que aparecen que son la conductividad y espesor del revestimiento, así como el valor de la emisividad que será diferente de la del caso anterior al no ser el mismo material.

Tabla 10 Parámetros del caso 2

| Parámetro | Unidad | Valor |
|------------|--------------------|-------|
| k_{rev} | W/m ⁰ C | 2,3 |
| ϵ | (-) | 0,93 |
| e_{rev} | mm | 20 |

2.3.3 Colector solar acristalado

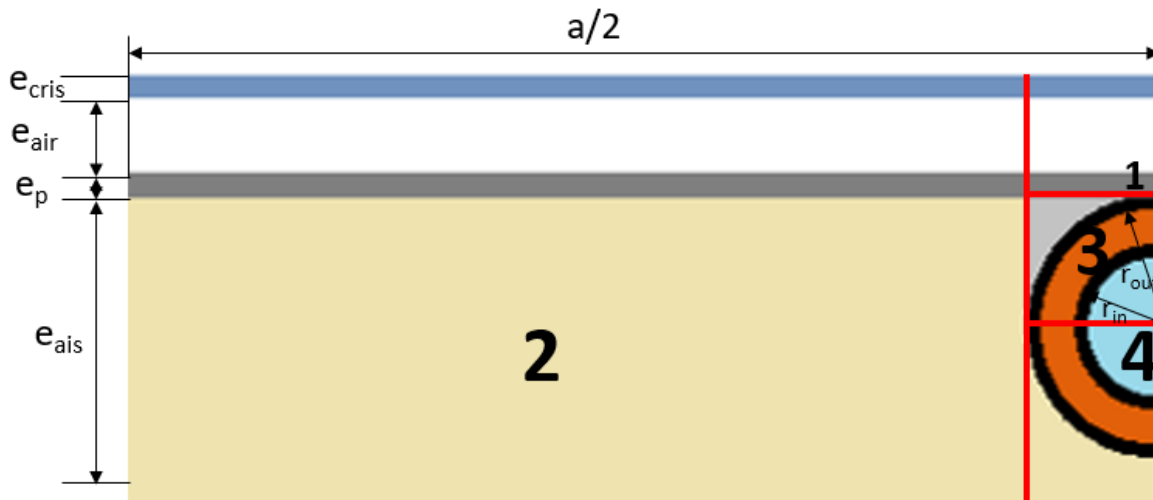


Ilustración 43 Secciones aplicadas al colector caso 3

En este caso, el colector tendría un acristalamiento en su cara exterior. Para los cálculos correspondientes al acristalamiento se ha aplicado la metodología recogida en la UNE-EN 673, desarrollando los balances de potencia calorífica de acuerdo con las explicaciones de Duffie y Beckman (62), de forma que en este caso se tendría:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (40)$$

$$R_1 = \frac{1}{h_{ext} + \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{(T_p^4 - T_a^4)}{(T_p - T_a)}} \quad (41)$$

$$R_2 = \frac{1}{h_t} \quad (42)$$

$$R_3 = \frac{1}{h_i} \quad (43)$$

$$h_t = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{e_{cris}}{k_{cris}}} \quad (44)$$

$$h_s = h_g + h_r \quad (45)$$

$$h_r = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_{mair}^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (46)$$

$$h_g = Nu_{gas} \cdot \frac{\lambda_{gas}}{e_{cavidad}} \quad (47)$$

$$Nu_{gas} = 0,035 \cdot (Gr_{gas} \cdot Pr_{gas})^{0,38} \quad (48)$$

$$Gr_{gas} = \frac{9,81 \cdot e_{cav}^3 \cdot \Delta T_{cav} \cdot \rho_{gas}^2}{T_{mair} \cdot \mu_{gas}^2} \quad (49)$$

$$Pr_{gas} = \frac{\mu_{gas} \cdot c_{gas}}{\lambda_{gas}} \quad (50)$$

En este caso, aparecen nuevos parámetros que tomarán los siguientes valores:

Tabla 11 Parámetros específicos del caso 3

| Parámetro | Unidad | Valor |
|-----------------|----------------------|-------|
| ε_1 | - | 0,873 |
| ε_2 | - | 0,07 |
| h_i | W/(m ² K) | 7,7 |
| e_{cris} | mm | 4 |
| k_{cris} | W/m ⁰ C | 1 |
| T_{mai} | K | 283 |
| e_{cav} | mm | 20 |

| | | |
|-------------------------|-------------------|------------------------|
| ρ_{gas} | kg/m ³ | 1,232 |
| c_{gas} | kJ/kg | 1,008 |
| μ_{gas} | kg/m·s | 1,761·10 ⁻⁵ |
| λ_{gas} | W/m·K | 2,496·10 ⁻² |
| ΔT_{cav} | K | 15 |

2.3.4 Colector solar continuo no acristalado

En un colector solar continuo, los cálculos se simplifican con respecto a un colector tradicional. Esto se debe a que, en este tipo de colectores, las secciones son más simples. Por lo tanto, en este caso el primer principio de la termodinámica se puede plantear directamente como:

$$\dot{Q}_{\text{sol}} = \dot{Q}_{\text{gua}} + \dot{Q}_{\text{perdidas}} \quad (51)$$

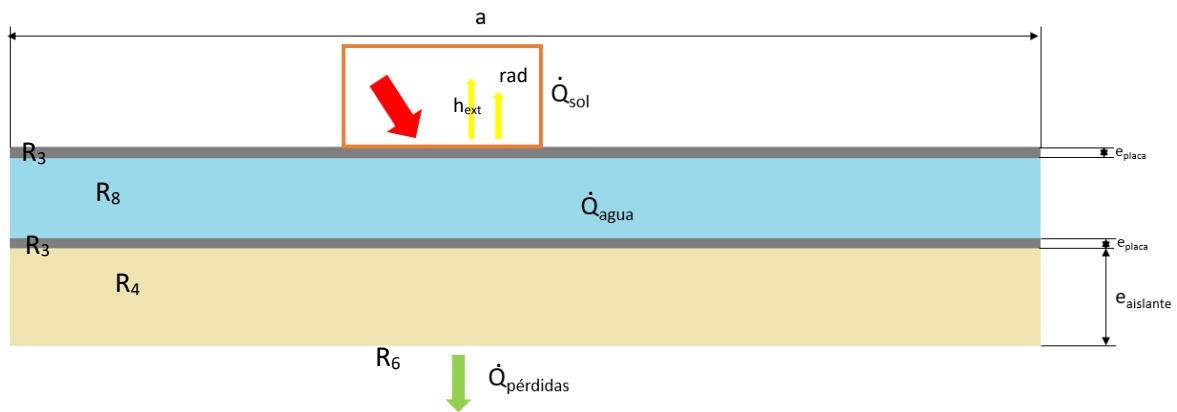


Ilustración 44 Esquema de calores en el colector

Donde:

$$\dot{Q}_{\text{sol}} = A \cdot (I \cdot \alpha - h_{\text{ext}} \cdot (T_p - T_a) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4)) \quad (52)$$

$$\dot{Q}_{\text{perdidas}} = \frac{(T_{\text{agua}} - T_a)}{R_3 + R_4 + R_5} \quad (53)$$

$$\dot{Q}_{\text{agua}} = \frac{(T_p - T_{\text{agua}})}{R_3 + R_8} \quad (54)$$

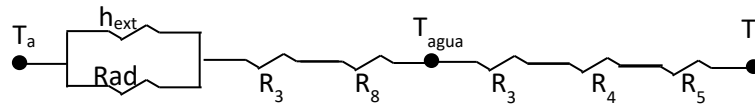


Ilustración 45 Esquema eléctrico equivalente caso 4

En este caso, faltaría definir únicamente las resistencias térmicas que serían las siguientes:

$$R_3 = \frac{e_{placa}}{k_{placa} \cdot A} \quad \text{Resistividad a la conducción de la placa} \quad (55)$$

$$R_4 = \frac{e_{ais}}{k_{ais} \cdot A} \quad \text{Resistividad a la conducción del aislante} \quad (56)$$

$$R_5 = \frac{1}{h_{tras} \cdot A} \quad \text{Resistividad por convección en el trasdós} \quad (57)$$

$$R_8 = \frac{1}{h_{agua} \cdot A} \quad \text{Resistividad del agua por convección} \quad (58)$$

Tanto en este caso como en los que se expondrán a continuación de colectores continuos, en general, se han utilizado los mismos parámetros geométricos y ambientales que en los colectores tradiciones.

2.3.5 Colector solar continuo no acristalado con revestimiento

Los cambios que hay que hacer para este caso con respecto del anterior son mínimos. Básicamente la diferencia se limita a la adición de una resistencia en el término referido a la transferencia de calor al agua que represente la transferencia de calor por conducción a través del revestimiento, es decir:

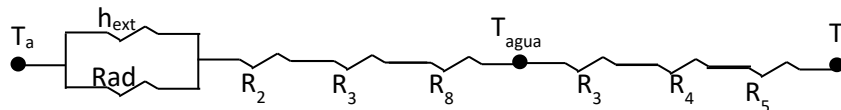


Ilustración 46 Esquema eléctrico equivalente del caso 5

$$\dot{Q}_{agua} = \frac{(T_p - T_{agua})}{R_2 + R_3 + R_8} \quad (59)$$

Siendo

$$R_2 = \frac{e_{rev}}{k_{rev} \cdot A} \quad (60)$$

2.3.6 Colector continuo acristalado

En este último caso, se realizan de nuevo los cálculos de la norma UNE-EN 673 que se presentaron anteriormente, que modifican las ecuaciones de forma que resulta:

$$\dot{Q}_{sol} = \dot{Q}_{gua} + \dot{Q}_{perdidas} + \dot{Q}_{cristal} \quad (61)$$

Siendo $Q_{cristal}$:

$$\dot{Q}_{cristal} = \frac{(T_P - T_{agua})}{R_1 + R_2} \quad (62)$$

$$R_1 = \frac{1}{A \cdot h_i} \quad (63)$$

$$R_2 = \frac{1}{h_t \cdot A} \quad (64)$$

Donde h_i tiene un valor de $7,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ y h_t está definido en la ecuación (44)

2.3.7 Validación mediante el caso Batisol

Para poder extraer conclusiones relevantes, es necesario validar el modelo propuesto con resultados experimentales. Para ello, se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos mediante el método propuesto y los obtenidos por elementos finitos previamente validados con datos experimentales obtenidos en proyectos de investigación participados por Tecnalia.

Con este objetivo se han realizado una serie de modificaciones al programa para una mejor aproximación del colector al modelo de Batisol, previamente mencionado en el análisis del estado del arte (página 29). Una de las más relevantes es la sustitución de las tuberías circulares por otras de sección rectangular. Además, ha sido necesario variar los parámetros geométricos y los materiales empleados para comprobar su correcto ajuste. Se han realizado los cálculos con los siguientes parámetros ambientales y geométricos:

Tabla 12 Parámetros del modelo Batisol

| | | | | | |
|--------------|--------------------------------|------|-------------|--------------------------------|-------|
| α | | 0,95 | a_{canal} | mm | 15 |
| v_{viento} | m/s | 8 | e_{canal} | mm | 2 |
| e_p | mm | 1 | e_{mat} | mm | 10 |
| k_p | $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ | 237 | k_{mat} | $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ | 0,15 |
| ϵ | | 0,95 | e_{ais} | mm | 20 |
| a | mm | 70 | k_{ais} | $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ | 0,025 |
| L | m | 1 | v_{agua} | l/h | 7 |

Como la sección es rectangular habrá que utilizar el diámetro hidráulico que se define como:

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{P} = \frac{4 \cdot a_{canal} \cdot e_{canal}}{2 \cdot (a_{canal} + e_{canal})} \quad (65)$$

Realizados estos cambios al modelo, se realiza una comparación contra los resultados obtenidos en (58) que quedan recogidos en las siguientes imágenes:

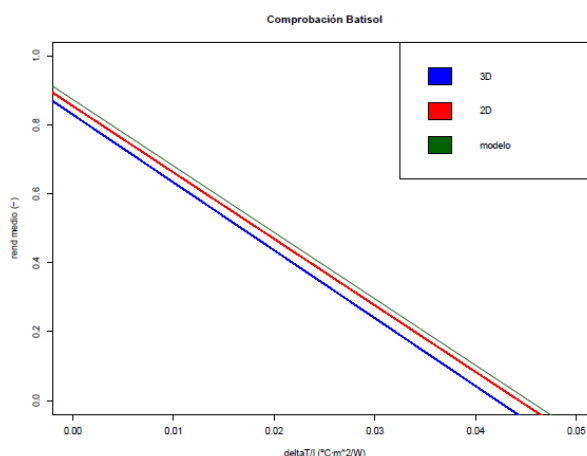
Tabla 13 Correlaciones para un modelo 2D (58)

| Nº | α | ε | h_{av} | Corrélations |
|-----|----------|---------------|----------|--------------------------|
| (a) | 0.6 | 0.2 | 5 | 0.576-7.44* $\Delta T/I$ |
| (b) | 0.6 | 0.2 | 15 | 0.549-16.2* $\Delta T/I$ |
| (c) | 0.95 | 0.95 | 5 | 0.899-10.9* $\Delta T/I$ |
| (d) | 0.95 | 0.95 | 15 | 0.855-19.3* $\Delta T/I$ |

Tabla 14 Correlaciones para un modelo pseudo 3D (58)

| Nº | α | ε | h_{av} | Corrélations |
|-----|----------|---------------|----------|--------------------------|
| (a) | 0.6 | 0.2 | 5 | 0.578-7.44* $\Delta T/I$ |
| (b) | 0.6 | 0.2 | 15 | 0.546-14.0* $\Delta T/I$ |
| (c) | 0.95 | 0.95 | 5 | 0.885-12.7* $\Delta T/I$ |
| (d) | 0.95 | 0.95 | 15 | 0.830-19.7* $\Delta T/I$ |

La comparación de resultados se va a realizar gráficamente introduciendo las rectas de funcionamiento validadas en experimentos previos señaladas en ambas tablas:



Gráfica 3 Comprobación del modelo Batisol

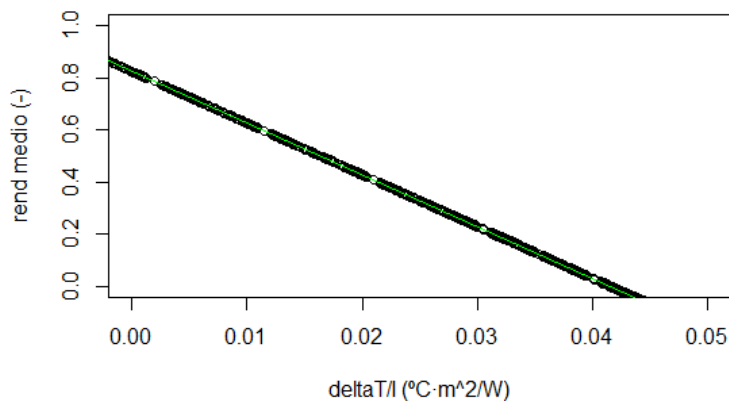
Aunque es cierto que es algo menos preciso, siendo la línea verde el modelo que se quiere validar, supone una primera aproximación bastante aceptable para el diseño de un colector además de tener

la ventaja de ser sustancialmente más rápido que un programa de elementos finitos y más barato que una instalación experimental.

2.4 Descripción de los resultados

2.4.1 Resultados del barrido paramétrico

Dado que los resultados que se obtienen de las simulaciones de las diferentes geometrías tienen tendencias bastantes similares para todos los casos estudiados, el desarrollo de este trabajo va a centrarse principalmente en la explicación de los colectores solares no acristalados y se hará mención de algunas gráficas de otras geometrías que se considere que contienen información para extraer conclusiones relevantes. Las gráficas y resultados correspondientes a las demás geometrías constan en los anexos.



Gráfica 4 Recta de operación del colector no acristalado

La Gráfica 4 representa la recta de operación de un colector solar no acristalado. Dicha recta se obtiene mediante la ecuación característica del colector que tiene la siguiente forma:

$$\eta = a_0 + b_0 \cdot \frac{T_{\text{agua}} - T_a}{I} \quad (66)$$

En este primer caso, los coeficientes son:

Tabla 15 Coeficientes de ecuación característica colector no acristalado

| a_0 (-) | b_0 (W/m ² ·°C) |
|-----------|------------------------------|
| 0,8227652 | -19,79222 |

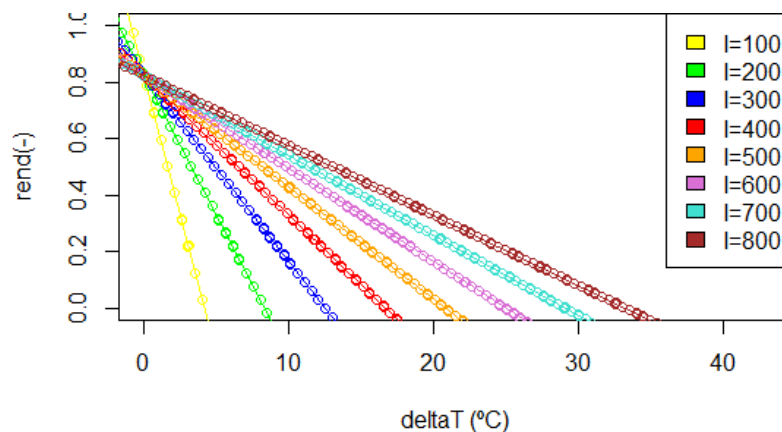
Esta ecuación característica se obtiene para una geometría base de las siguientes características:

Tabla 16 Parámetros geometría base

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------|-------|--------|
| | | |

| | | |
|-------------------|------------------------|--------|
| v_{agua} | 30 | l/h |
| a | 100 | mm |
| e_{ais} | 300 | mm |
| k_{ais} | 0,025 (poliuretano) | W/m·°C |
| e_p | 3 | mm |
| k_p | 237 (aluminio) | W/m·°C |
| d_{in} | 8 | mm |
| d_{out} | 10 | mm |
| k_t | 401 (cobre) | W/m·°C |
| k_{sol} | 67 (estaño) | W/m·°C |

Se puede deducir, que este tipo de colectores presentan rendimientos bastante buenos cuando se tienen valores pequeños de $\Delta T/l$, es decir que principalmente son recomendables cuando la diferencia de temperatura va a ser pequeña o cuando la irradiancia es muy grande. De hecho, se considera que la relación entre el rendimiento y la diferencia de temperatura también es interesante de analizar, así como la influencia que tiene sobre ella la irradiancia. Esto queda recogido en la siguiente gráfica:



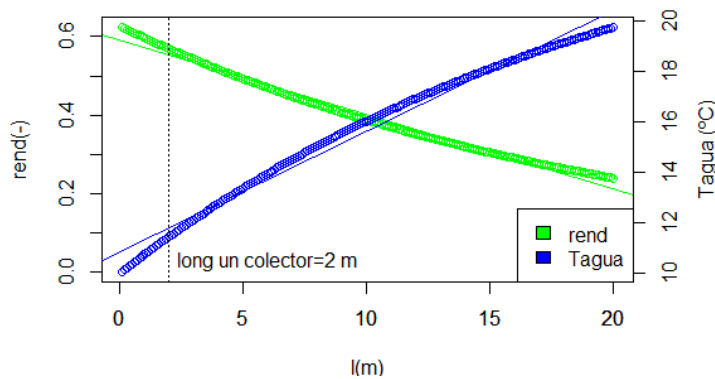
Gráfica 5 Rendimiento vs diferencia de temperatura para varias irradiancias

En línea con lo que se comentaba antes, como se puede ver, la irradiancia tiene una influencia notable, ya que a mayores valores e la misma, la diferencia de temperatura para la que el colector es válido se amplía sustancialmente. En este caso la diferencia de temperatura se ha definido como la diferencia de temperatura entre el agua del colector y el ambiente, no con la placa como se hizo anteriormente. Como se puede ver, con el aumento de I , se pasa de diferencias de temperatura máximas de unos 5 °C

a unos 35 °C, por lo que el campo de aplicación de los colectores será mayor en zonas donde la radiación solar sea grande.

Con la información expuesta hasta aquí, se tendría un conocimiento bastante bueno de la tendencia de comportamiento de un colector no acristalado en función de la variación de las condiciones ambientales a las que esté sometido. A partir de aquí, quedaría conocer cómo afecta la variación de los parámetros geométricos al rendimiento del colector.

Para ello, la primera consideración que se va a hacer es cómo varían el rendimiento y la temperatura del agua a lo largo del colector. Para ello se ha establecido una longitud total del colector de 20 m que equivaldría a 10 colectores de 2 m de longitud cada uno conectados en serie, lo cual es una instalación bastante típica. En el siguiente gráfico se puede observar la evolución del rendimiento y la temperatura en el circuito explicado, marcando también el final del primer colector del circuito.



Gráfica 6 Variación del rendimiento y la temperatura con la longitud

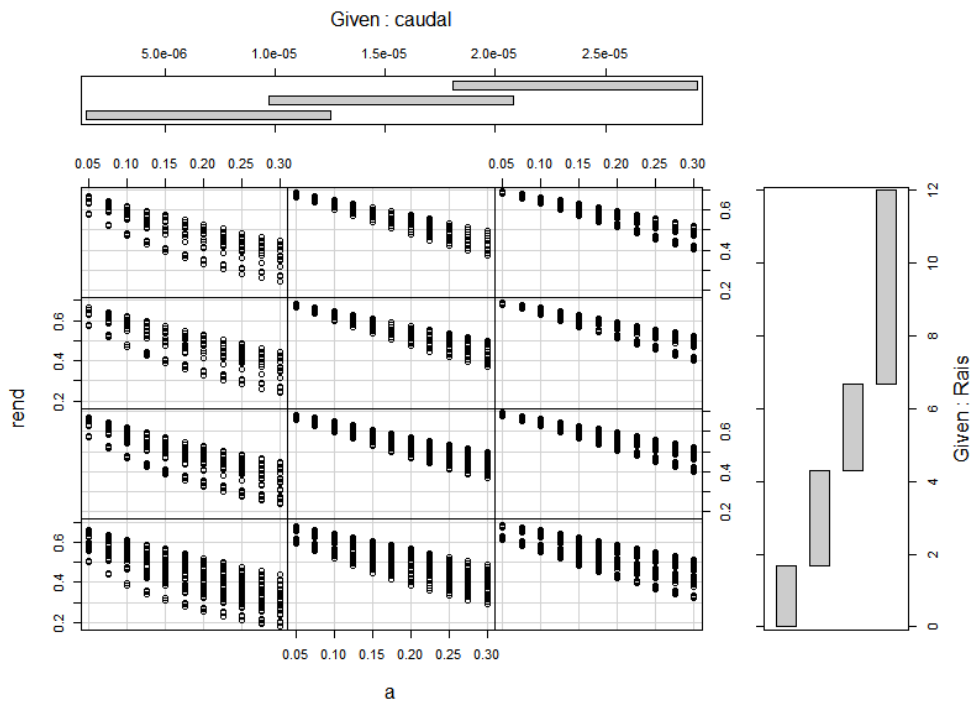
Se observa cómo la temperatura y el rendimiento tienen tendencias contrarias, es decir, mientras que la temperatura aumenta con la longitud, el rendimiento disminuye, lo cual es bastante lógico, ya que al aumentar la temperatura del agua, la diferencia entre esta y la del tubo disminuyen y al disminuir dicha diferencia también lo hace el rendimiento. Además la tendencia de ambas curvas se aproxima bastante bien a una recta, lo cual es muy coherente con las ecuaciones que se han planteado que son principalmente lineales.

Visto el impacto que tiene la longitud en el rendimiento, cabe pensar que el propio ancho del colector podría ser un parámetro con impacto notable en el rendimiento del colector al suponer un aumento de la superficie sobre la que incidirá la radiación solar, pero al mismo tiempo, un aumento del área de dispersión al mantenerse constante el tamaño de las tuberías. En la Gráfica 7 se puede ver cómo varía el rendimiento con la anchura de placa, para distintos valores del aislamiento y caudales.

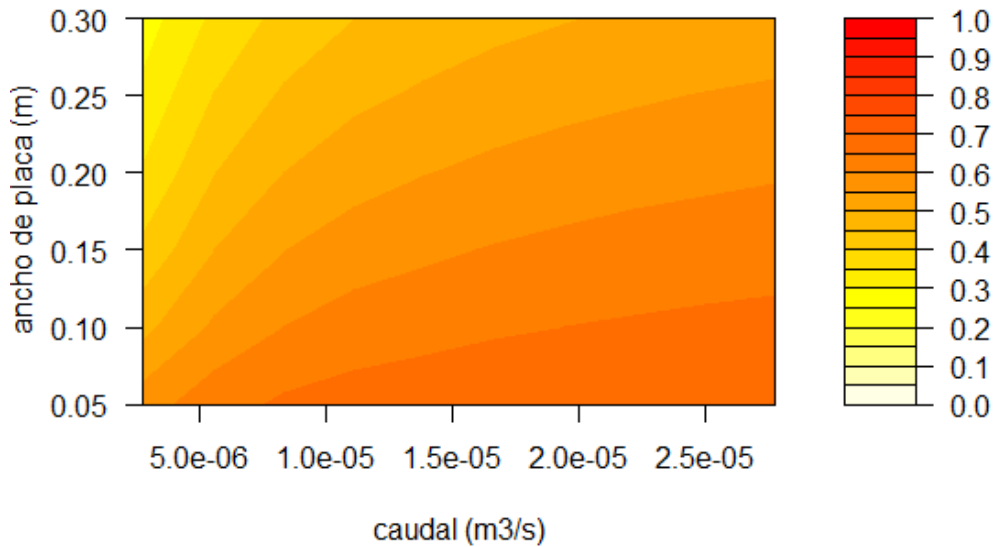
Resulta evidente que tal y como se predecía, según disminuye la anchura de placa se obtienen mayores valores del rendimiento. Así mismo, se puede comprobar que el aislante es otro factor a tener en cuenta ya que sobre todo a valores reducidos de la resistividad ofrecida por el mismo, es decir

situaciones como colectores sin aislamiento o con poco, presentan rendimientos menores que los casos en los que el aislante presenta resistividades elevadas. En un caso de caudal reducido y poco aislante, se puede tener una reducción del rendimiento del 60% aproximadamente al variar el ancho de placa de 50 mm a 300 mm, mientras que para una variación equivalente de anchura, con un buen aislante térmico, esta variación cae un 2%. Además, llevando la atención únicamente a la influencia del aislante, este puede suponer una disminución en el rendimiento del 16,7% desde la situación con más aislante a la de menor resistividad.

Se ve también que el caudal es un factor importante para el rendimiento, ya que como se puede observar en la gráfica para un caudal más pequeño, el rendimiento es más bajo. Como se considera que en esta gráfica no se termina de apreciar el efecto en toda su magnitud, se ha elaborado otra donde esta relación entre rendimiento, anchura de placa y caudal se puede analizar en mayor detalle.



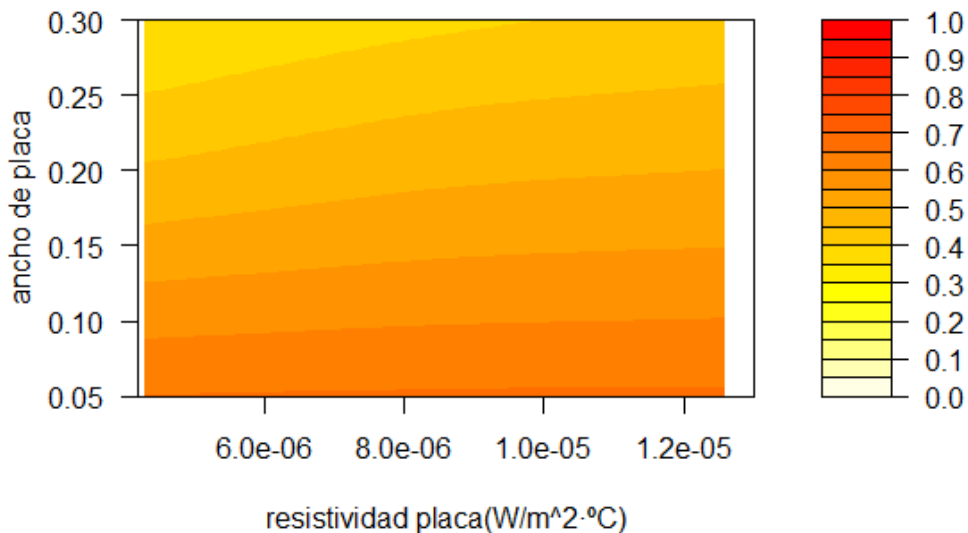
Gráfica 7 Ancho vs. Rendimiento según caudal y aislamiento colector no acristalado



Gráfica 8 Rendimiento según ancho vs caudal

En la Gráfica 8 se puede ver de forma bastante clara cómo interaccionan el ancho de placa y el caudal en la variación del rendimiento. Claramente, una vez más se ve cómo el aumento del ancho de placa causa un descenso del rendimiento, así como un aumento del caudal lo mejora. Además, se puede ver en la gráfica cómo el ancho de placa tiene mayor influencia en el rendimiento cuanto menor es el caudal, tendiendo hacia la horizontalidad es decir hacia la constancia cuando el caudal es mayor.

La última gráfica que se considera se realiza para ver la influencia de la resistividad de la placa absorbente, comparada contra el ancho cuyo efecto en este punto ya es sobradamente conocido.



Gráfica 9 Rendimiento para ancho vs resistividad de placa

Como se ve, la influencia en el rendimiento de la resistividad de la placa es bastante pequeña, aunque sí que se puede apreciar cómo esta influencia aumenta cuando el ancho de la placa es mayor, lo que

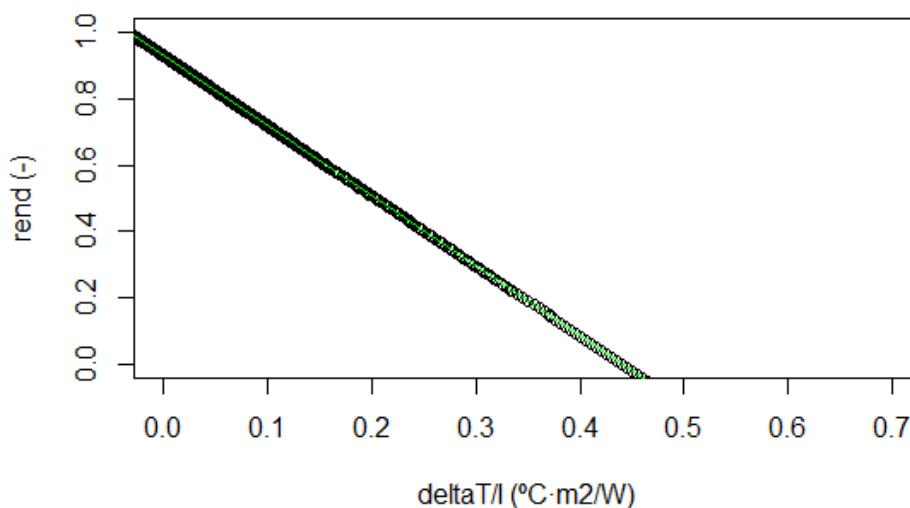
es bastante lógico ya que aumenta la superficie de conducción y por lo tanto cuanto mayor sea, más se notarán los efectos de una mayor o menor resistividad en la placa.

Hasta aquí llegan las observaciones relativas al colector solar no acristalado, que son extensibles en la mayoría de los casos. Sin embargo se considera que es interesante también hacer algunos comentarios comparando los resultados del no acristalado con un colector acristalado, ya que presentan algunas diferencias reseñables, empezando con la ecuación característica:

Tabla 17 Coeficientes de la ecuación característica del colector acristalado

| $a_0 (-)$ | $b_0 (W/m^2 \cdot ^\circ C)$ |
|-----------|------------------------------|
| 0,9286138 | -2,113046 |

Para la realización de estos cálculos se ha partido de una geometría de las mismas características que para el colector no acristalado, añadiendo una acristalamiento con las características que constan en la Tabla 11.



Gráfica 10 Recta de operación del colector acristalado

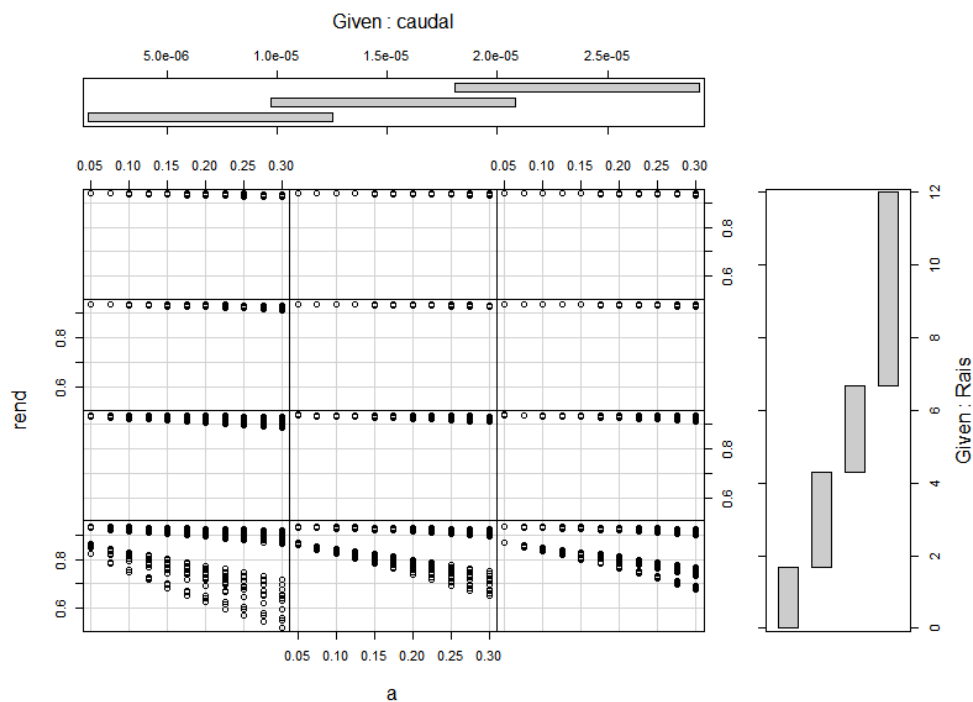
Básicamente de la comparación de esta recta con la del caso anterior pueden extraerse dos conclusiones principales. La primera es que para dos colectores de las mismas características uno de ellos acristalado y el otro no, presenta mejor rendimiento el colector acristalado. La segunda, es que el rango de $\Delta T/I$ para el que son aptos los colectores acristalados es de un orden de magnitud superior, lo cual se relaciona directamente con las mayores diferencias de temperatura con las que operan estos sistemas como ya se había mencionado.

También esta tecnología tiene otro detalle que se encuentra digno de mención y es el comportamiento que tienen estos sistemas con respecto a la influencia del aislante. Como se ve en la Gráfica 11, para los colectores acristalados, el ancho es un parámetro cuya influencia es muy grande en el caso en el que no existe aislamiento. Sin embargo, se puede ver en la gráfica cómo cuanto mayor es la resistividad

del aislante menor es la caída del rendimiento a consecuencia de la anchura, siendo de hecho prácticamente despreciable cuando la resistividad es muy elevada.

Lo mismo ocurre con el caudal, lo que nos lleva a una conclusión evidente: los colectores acristalados son en sí mismos sistemas muy eficientes en los que las pérdidas exteriores ya están bastante reducidas gracias al aislamiento que aporta el cristal, si a esto se le añade un buen aislamiento en la parte posterior del colector, resulta un sistema que tendría unos rendimientos altísimos para los parámetros que se han considerado en este análisis.

Esto puede llevar a pensar que los sistemas acristalados son la tecnología por la que habría que apostar ya que los rendimientos que se obtienen son muy altos. Pero hay que tener en cuenta que el precio de esta tecnología es bastante más elevado y por ello su generalización es más problemática, por lo que es preferible su aplicación en circunstancias en las que se trabaje con rangos de temperaturas más bien elevados.



Gráfica 11 Ancho vs. Rendimiento según caudal y aislamiento colector acristalado

En los anexos constan las gráficas restantes para su consulta, sin embargo, dado que las diferencias entre ellas son escasas, sobre todo en cuanto a tendencias, se ha considerado innecesario explicar todas ellas en este apartado.

2.4.2 Configuración óptima de cada geometría

Ya se ha mencionado que las tendencias que siguen los rendimientos en función de la variación de los parámetros geométricos, son bastante similares para todos los casos, sin embargo faltaría definir esta influencia con mayor precisión y de manera más concreta, de forma que se puedan extraer conclusiones verdaderamente relevantes.

Para ello, se ha elaborado la siguiente tabla resumen:

Tabla 18 Resumen de variaciones de rendimiento según parámetros

| | | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 |
|----------|-------------------------|------------|------------|-----------|----------|----------|----------|
| Ancho | %/mm | -0,0885% | -0,0817% | -0,0014% | -0,0246% | -0,0274% | -0,0062% |
| Caudal | %/(l/h) | 0,2743% | 0,2718% | 0,0078% | 0,2800% | 0,2956% | 0,0757% |
| Aislante | %/(m ² ·K/W) | 1,3349% | 0,6469% | 1,7185% | 0,7382% | 0,6999% | 0,9174% |
| Placa | %/(m ² ·K/W) | -891830,5% | -878948,4% | -27284,1% | -1186,1% | -1268,6% | -115,7% |

Probablemente, una de las cosas que más llama la atención en esta tabla de primeras, es el hecho de que las variaciones que se han calculado para el rendimiento según la variación de la resistividad de la placa son realmente grandes, sobre todo si se tiene en cuenta que en las gráficas anteriormente expuestas, parecía que era prácticamente nula. Esto tiene una explicación simple, en el barrido que se ha realizado, la variación de la resistividad de la placa era muy pequeña, de aproximadamente 10⁻⁶ m²·K/W, de forma que en el rango realmente observado, la variación es aproximadamente la siguiente:

Tabla 19 Variación de rendimiento según la resistividad de placa

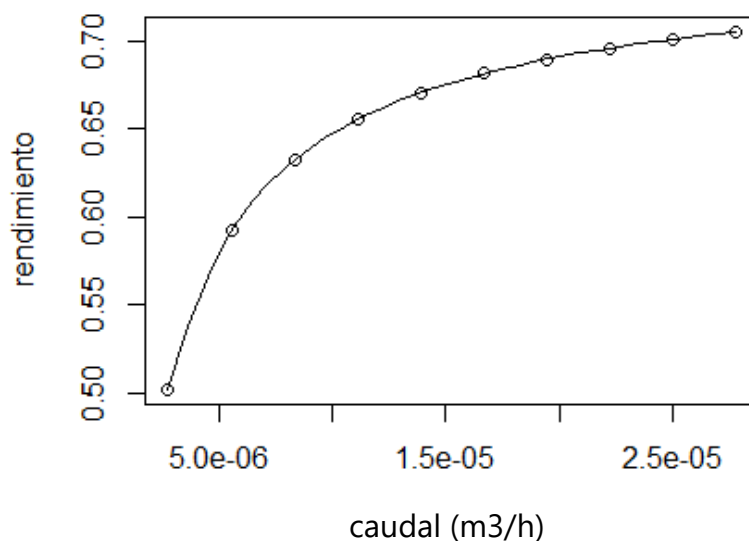
| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| Placa | -0,3763% | -0,3709% | -0,0115% | -0,0005% | -0,0005% | 0,0000% |

Como se ve, la influencia de este parámetro es muy pequeña, llegando incluso a ser despreciable en el caso del colector continuo acristalado. Además, la realidad es que la placa absorbente debería siempre tener una resistividad pequeña por lo que no tiene demasiado sentido tratar con magnitudes como las de la primera tabla, donde se estaría tratando bien con placas muy gruesas, bien con materiales muy poco conductores. Aclarado esto, se pasa a comentar la influencia del resto de los parámetros.

Empezando por el ancho, se puede comprobar que el rendimiento es inversamente proporcional al ancho, es decir, por cada milímetro que se reduce el ancho, entendido como el espacio que existe entre dos tubos consecutivos, el rendimiento cae, siendo la reducción más notable en los colectores no acristalados que en los acristalados y en los tradicionales mayor que en los continuos. Por lo tanto, en lo referente al ancho, sería recomendable diseñar un colector tal que la anchura del mismo sea mínima. Poniendo esto en términos de un colector tradicional, el ancho mínimo sería situar los tubos

por los que circula el fluido, tangentes los unos a los otros, de forma que se obtiene una geometría bastante similar a lo que sería un colector continuo, por eso el ancho es menos relevante para este tipo de geometría.

A continuación, se repasa la influencia del caudal. Como se ve, no es una influencia despreciable, lo cual ya se venía viendo en las gráficas anteriores. A priori, visto el número puede parecer que la relación es tan simple como cuanto menor sea el caudal, peor rendimiento se va a obtener, y hasta cierto punto, es cierto. Sin embargo, si se realiza un análisis más detallado del caudal, se observa cómo la tendencia de la relación entre caudal y rendimiento no es lineal, si no que realmente tiene la forma que se observa en la siguiente gráfica:



Gráfica 12 Relación entre el caudal y el rendimiento

Como se puede ver, el rendimiento crece muy rápido con la variación del caudal cuando este es pequeño y después tiende a estabilizarse, lo que se relaciona con factores como el número de Nussel, o el tipo de régimen en el que fluye el agua. Por lo tanto en los colectores solares en general, será interesante trabajar con caudales grandes, pero convendrá hacer análisis concretos para el cálculo del punto a partir del cual los incrementos de rendimiento son despreciables.

Volviendo a la tabla se comprueba que los colectores no acristalados son los más sensibles en general, pero en este caso son las tecnologías continuas las que más notan la variación del caudal a la hora de aumentar o disminuir su rendimiento.

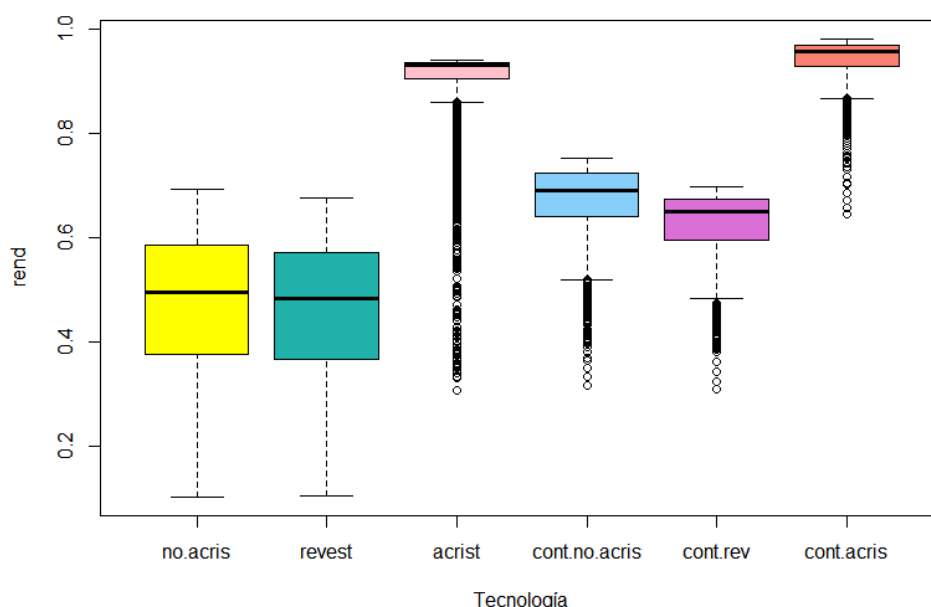
Por último, el aislante, que vistos los resultados parece el factor de mayor influencia sobre el rendimiento, lo cual es cierto, pero hasta cierto punto. Lo que consta en la tabla son las variaciones medias del rendimiento según la influencia del parámetro de estudio en este caso el aislamiento que se coloque y verdaderamente el valor medio es el que consta y además es muy razonable que el

rendimiento aumente cuanto mejor aislado se encuentre el sistema. Sin embargo, un análisis más detallado de la relación, demostraría que la gran diferencia existe en la mera presencia o no de aislante, no habiendo tanta diferencia una vez que este es suficiente como para cubrir el tubo. Cumplida esta condición y trabajando con valores de conductividad de aislante normales, su influencia es mínima.

Curiosamente, el aislamiento adicional que el revestimiento, que en general no suele ser de un buen material conductor, aporta a estos colectores, es suficiente para que los colectores revestidos, tanto tradicionales como continuos, sean los que menos sufran una disminución del rendimiento.

2.4.3 Posicionamiento de las distintas geometrías

Una vez analizados los resultados necesarios para diseñar colectores optimizados, resulta interesante posicionarlos en base al rendimiento medio de cada una de las tecnologías analizadas para compararlos entre sí de forma que se puedan extraer conclusiones relevantes de la comparación de los mismos. Los resultados obtenidos quedan recogidos en el siguiente gráfico de caja de Tukey:



Gráfica 13 Posicionamiento de las distintas geometrías

Para la elaboración de este gráfico se han tomado los valores de los rendimientos dadas unas condiciones ambientales específicas, y considerando el barrido geométrico completo que se ha realizado. Las condiciones ambientales son las siguientes:

Tabla 20 Condiciones ambientales

| Variable | Valor | Unidad |
|----------------|-------|------------------|
| I | 500 | W/m ² |
| T _a | 5 | °C |

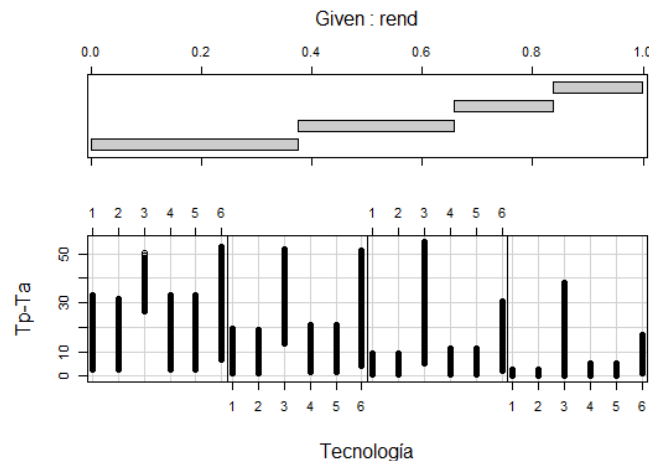
| | | |
|-------------------|----|----|
| T_{agua} | 10 | °C |
|-------------------|----|----|

Resulta evidente, mediante simple observación de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que para esas condiciones los colectores acristalados presentan unos rendimientos prácticamente óptimos, lo cual se debe principalmente a la disminución de las pérdidas por convección y radiación gracias a la existencia de acristalamiento.

Otra observación que se puede hacer es que los colectores continuos son más eficientes que sus equivalentes tradicionales. En sí, esto es una idea bastante intuitiva, y previamente explicada, puesto que todo el razonamiento que hay detrás de los colectores continuos es lograr un aprovechamiento mucho mejor del calor al eliminar las pérdidas de conducción que se dan en varios elementos de un colector tradicional. Por ejemplo, desaparecen las pérdidas por conducción en las tuberías, por el aislante situado entre tuberías o la conducción en la soldadura, de forma que el calor que absorbe la placa de la radiación se transfiere prácticamente de forma íntegra al agua.

Además, los revestimientos no suponen un impacto muy relevante en el rendimiento global del colector como se puede comprobar, lo cual es muy interesante puesto que añadir revestimientos de materiales pétreos o cerámicos favorecerá la extensión de las FSTAs al facilitar la integración de las mismas gracias a la mejora estética.

Otro factor importante a considerar para posicionar las distintas tecnologías, es el rendimiento que presentan según la diferencia de temperatura que exista entre la placa y el ambiente.



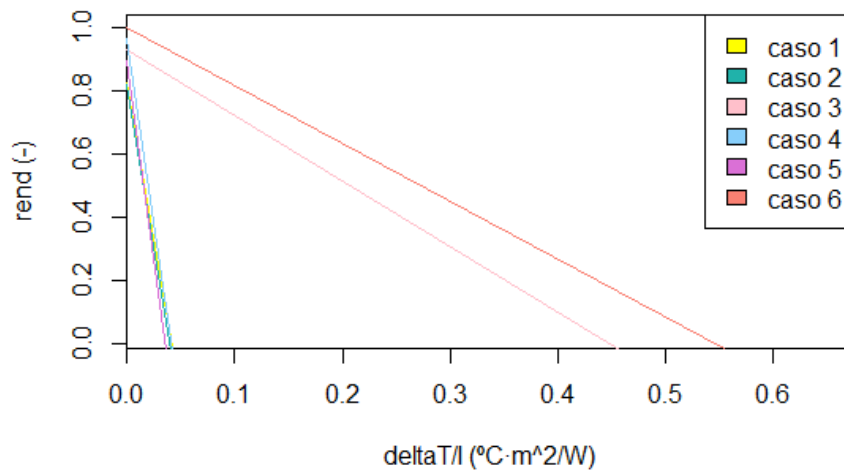
Gráfica 14 Intervalos de rendimiento según tecnología y diferencia de temperatura

Una de las primeras observaciones a realizar, es que los colectores solares acristalados, tanto tradicional como continuo son en los que se obtienen mayores diferencias de temperatura entre la placa absorbente y el ambiente. Además estas diferencias de temperatura son bastantes superiores a las del resto de tecnologías en todos los intervalos de rendimiento que se tienen.

Sin embargo, se considera necesario también hacer una referencia al hecho de que, como se puede ver, las franjas de $(T_p - T_a)$ se solapan para los diferentes intervalos de rendimiento. Esto ocurre por los diferentes valores de irradiancia que se han considerado.

Estas franjas mencionadas, como se puede ver son más altas en los intervalos de rendimiento más bajos, es decir que son inversamente proporcionales. Menores diferencias de temperatura implican mayores rendimientos, lo cual era bastante previsible ya que si se piensa directamente en el balance de energía planteado, las pérdidas tanto por radiación como las de convección exterior y en el trasdós dependen directamente de esta diferencia luego cuanto menor sea menos pérdidas habrá.

Por último, a continuación se presentan las rectas de operación de todas las tecnologías analizadas, dados los parámetros geométricos del caso base con el que se ha trabajado para comparar la eficiencia para diferentes condiciones ambientales:



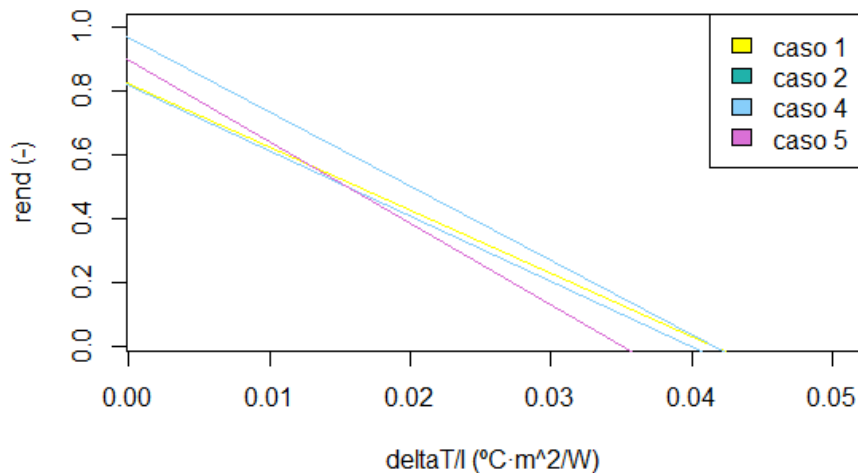
Gráfica 15 Rectas de operación de todos los colectores

De esta primera gráfica se pueden deducir principalmente hechos comparativos entre los colectores acristalados y los no acristalados ya que al ser tan diferente el rango válido de $\Delta T/I$, no se aprecian bien las diferencias entre las diferentes tecnologías no acristaladas, por lo que se realizará luego un zoom de esa zona para su análisis.

Por lo que respecta a la Gráfica 15, dos observaciones son evidentes, el colector continuo acristalado es el de mayor eficiencia y el aplicable a un rango mayor de $\Delta T/I$, siendo este último de orden similar al del colector acristalado tradicional. Además, para valores bajos de $\Delta T/I$, los rendimientos de todos los colectores son muy similares y para las aplicaciones en viviendas para las que se consideran estos colectores en general el rango de los colectores no acristalados es suficiente, por lo que dado el factor económico, se muestran una vez más como una opción a considerar.

Entrando más en detalle en los colectores no acristalados que pueden verse en la siguiente gráfica, lo primero que se observa es que las diferencias de rendimiento entre las versiones revestidas y las no revestidas son pequeñas, estando las revestidas ligeramente por debajo, diferencia que aumenta

cuanto mayor es $\Delta T/l$. Además, en la comparación entre el colector tradicional y el continuo se ve que el colector continuo revestido sí tiene mejor rendimiento para valores bajos de $\Delta T/l$, pero cae más rápido por lo que a partir de cierto punto, funcionan mejor los colectores tradicionales. Sin embargo, comparando los no revestidos, el continuo tiene mejor rendimiento, pero el rango de aplicación es el mismo para el continuo y el tradicional.



Gráfica 16 Rectas de rendimiento de los colectores no acristalados

En resumen, en lo que se refiere a posicionamiento de las diferentes tecnologías analizadas se destaca los siguientes aspectos:

- Los colectores acristalados, continuos y tradicionales son los que presentan mayores rendimientos.
- El rendimiento de los colectores continuos, supera al de los tradicionales por el mejor aprovechamiento del calor absorbido.
- Los rendimientos se puede considerar que son, para todas las tecnologías, mayores a temperaturas menores.
- Los colectores acristalados funcionan mejor que los no acristalados cuando las diferencias de temperatura son elevadas, de hecho, son los que logran mayores diferencias de temperatura.

2.5 Plan de proyecto y planificación

A continuación, se explicará la planificación del desarrollo experimental de un prototipo de FSTA. Una instalación de este tipo es bastante sencilla. Básicamente consiste en un colector solar sensorizado, de forma que sea posible recabar datos precisos, unido a un circuito hidráulico por el que circula el agua por acción de una bomba, este circuito dispone de una válvula de regulación y un depósito.

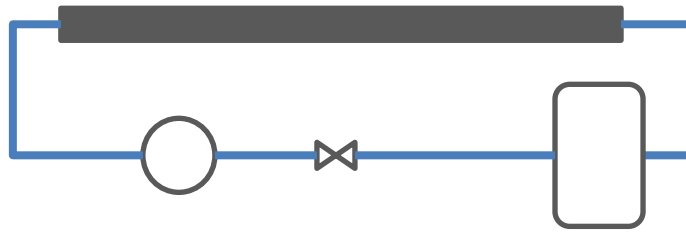


Ilustración 47 Esquema simplificado de instalación experimental

Una vez se haya diseñado el colector que se va a estudiar, para lo cual se utilizarán los modelos creados en este trabajo de forma que se parta de unos valores de referencia, se procederá a la fabricación del colector, así como la compra del resto de equipos y sensores necesarios para la realización de todas las mediciones.

La siguiente fase del proyecto consiste en el montaje de la instalación completa, que realizarán operarios experimentados en el tema. Cuando ya esté lista, se procederá a la comprobación de todos los equipos antes de comenzar con la recolección de datos experimentales, que se irán analizando para la obtención de conclusiones relevantes.



Ilustración 48 Diagrama de Gantt del desarrollo experimental

3 Aspectos económicos

Tras la realización de los cálculos energéticos, se procede a presupuestar una instalación experimental como la que se ha comentado en el plan de proyecto.

Se presentan también los costes que se han llevado a cabo para la realización de este proyecto.

Además, se justificará la rentabilidad de realización de este tipo de instalaciones en edificaciones de nueva construcción en comparación con el uso de fachadas tradicionales con sistemas de calefacción y ACS convencionales.

3.1 Descripción del presupuesto

3.1.1 Trabajo de fin de máster

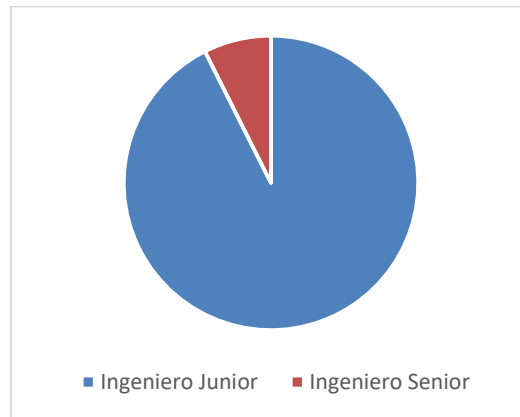
A continuación, se describen los recursos que han sido necesarios para la realización de este trabajo de fin de máster con el correspondiente presupuesto:

Tabla 21 Resumen presupuesto TFM

| PRESUPUESTO TOTAL | TOTALES | |
|--------------------------|--------------------|------------|
| Horas internas | 16.200,00 € | |
| Amortizaciones | 13,15 € | |
| Gastos | 4,50 € | |
| SUBTOTAL | 16.217,65 € | |
| Costes Indirectos | 7% | 1.135,24 € |
| <u>TOTAL</u> | 17.352,89 € | |

Como se puede ver en el anterior presupuesto, los mayores gastos del proyecto se deben a las horas internas dedicadas al mismo tanto por el ingeniero junior como por los ingenieros senior implicados.

Se estima que para este proyecto el ingeniero junior tendrá que emplear unas 600 horas a 25 € cada una, mientras los ingenieros senior dedicarán aproximadamente 24 horas 50 €. La distribución de estos costes puede observarse en la gráfica que aparece a continuación.



Gráfica 17 Distribución de costes horas internas

Como el software a utilizar en este proyecto es software libre, las amortizaciones son bastante bajas, debidas principalmente a la licencia de office y al ordenador que se ha empleado.

En los gastos se incluyen fotocopias y desplazamientos. Se asigna una partida de costes indirectos donde se incluyen otros gastos que no son directamente atribuibles al proyecto.

3.1.2 Desarrollo experimental

A continuación, se realiza el presupuesto de una instalación para el desarrollo experimental de una FSTA. Ya se ha mencionado antes que la instalación consta principalmente de un colector que se diseñará a partir de cálculos realizados con el software de este trabajo, al que se le añadirán múltiples sensores para monitorizar adecuadamente su comportamiento.

Por el interior del colector circulará un fluido que se moverá por acción de una bomba por el interior del circuito hidráulico.

Los sensores que se van a utilizar son los siguientes:

- **Caudalímetro:** Se colocará a la entrada del circuito solar para comprobar el caudal que circula en cada momento por el colector.
- **Sensor de temperatura para el agua a la entrada del colector:** Este sensor se situará junto con el anterior para conocer la temperatura con la que el fluido entra al colector.
- **Sonda de temperatura para inserción en flujo:** Se trata de un sensor del tipo termopar K para medir la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del flujo.
- **Sensor de irradiación global solar (piranómetro):** Será conveniente que este sensor se sitúe lo más cerca posible de la superficie del colector, perpendicular respecto de la fachada.
- **Sensor de dirección del viento:** A colocar cerca de la superficie del colector.

- **Sensor de velocidad del viento:** A colocar cerca de la superficie del colector.
- **Soporte para sensores de de dirección y velocidad del viento:** Existe un accesorio para agarrar ambos a una misma estructura.
- **Datalogger 20 inputs:** Servirá para el almacenamiento de datos.
- **Sensor de temperatura exterior:** Será necesario realizar el montaje de este sensor de forma que las demás variables no afecten.
- **Sensor de temperatura superficial:** Se colocará uno en cada módulo de colectores para registrar la temperatura superficial de la chapa.
- **Sensor de temperatura en agua:** Dos se colocarán a la entrada y salida del colector para realizar correlaciones con las medidas del resto, que se encontrarán adheridos a la tubería a la salida de cada módulo.

Otros equipos necesarios para la instalación incluyen los siguientes:

- **Bomba de impulsión:** Se colocará a la entrada del colector para favorecer la circulación del caudal por el interior del circuito hidráulico.
- **Válvula de seguridad:** La función de este elemento será garantizar que no haya fallos graves en el circuito.
- **Purgador automático:** Para purgar el caudal cuando sea necesario.
- **Válvula de regulación de caudal:** Se colocará a la salida del depósito, antes de la bomba para regular el caudal que fluye por el circuito.
- **Conexiones hidráulicas:** El conjunto de tuberías y conexiones para unir el colector al resto de la instalación.
- **Soportes de fijación para el colector:** Para unir los colectores a la fachada.
- **Depósito:** Servirá como elemento para la regulación del caudal.

El presupuesto de la instalación se completa con las horas internas necesarias para la instalación de todos los equipos, el ajuste de los sensores y resto de procedimientos para completar la instalación.

Con todo esto, el presupuesto resultante para el desarrollo experimental de la instalación es el estimado en la siguiente tabla:

Tabla 22 Presupuesto instalación para desarrollo experimental

| TOTAL 18.796,91 € | | | | |
|-----------------------------------------------------------|------------------|-------------|----------------------|--------------------|
| TOTAL 12.790,91 € | | | | |
| Descripción | Unidad medida | nº Unidades | Coste Unitario | Coste |
| Caudalímetro y sensor de temperatura | Ud | 1 | 260,00 € | 260,00 € |
| Sonda termopar K para inserción en flujo | Ud | 1 | 115,00 € | 115,00 € |
| Sensor de irradiación global solar | Ud | 1 | 404,00 € | 404,00 € |
| Sensor de dirección del viento | Ud | 1 | 870,00 € | 870,00 € |
| Sensor de velocidad del viento | Ud | 1 | 737,00 € | 737,00 € |
| Soporte para sensores de dirección y velocidad del viento | Ud | 1 | 144,00 € | 144,00 € |
| Datalogger con memoria | Ud | 1 | 6.615,00 € | 6.615,00 € |
| Sonda de temperatura clase B | Ud | 1 | 221,00 € | 221,00 € |
| Sensor de temperatura 4 hilos superficial | Ud | 6 | 90,00 € | 540,00 € |
| Sensor de temperatura 4 hilos en agua | Ud | 7 | 95,00 € | 665,00 € |
| | | | TOTAL SIN IVA | 10.571,00 € |
| TOTAL 2.540,08 € | | | | |
| Descripción | Unidad medida | nº Unidades | Coste Unitario | Coste |
| Colector solar | €/m ² | 1,2 | 407,00 € | 488,40 € |
| Soportes para fijación | Ud | 10 | 100,00 € | 1.000,00 € |
| Kit de conexiones hidráulicas | Ud | 1 | 91,67 € | 91,67 € |

Proyecto: Revestimiento de fachada de edificios activos para la mejora de la eficiencia energética

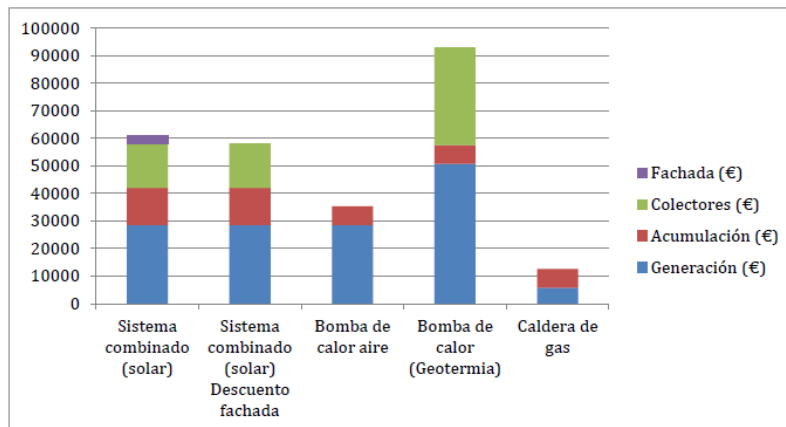
| | | | | |
|-------------------------------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| Purgador automático | Ud | 1 | 72,75 € | 72,75 € |
| Válvula de seguridad | Ud | 1 | 38,80 € | 38,80 € |
| Válvula de esfera | Ud | 2 | 9,81 € | 19,62 € |
| Bomba impulsión desplazamiento positivo con 3 cámaras | Ud | 1 | 245,00 € | 245,00 € |
| Depósito | Ud | 1 | 143,00 € | 143,00 € |
| | | | TOTAL SIN IVA | 2.099,24 € |
| | | | TOTAL | 3.465,92 € |
| <u>Descripción</u> | <u>Unidad medida</u> | <u>nº Unidades</u> | <u>Coste Unitario</u> | <u>Coste</u> |
| Oficial 1º Instalador de captadores solares | h | 40 | 19,11 € | 764,40 € |
| Operarios | h | 120 | 17,50 € | 2.100,00 € |
| | | | TOTALSIN IVA | 2.864,40 € |

Los precios que se han estimado en el anterior presupuesto se han obtenido de (60).

3.2 Análisis de rentabilidad

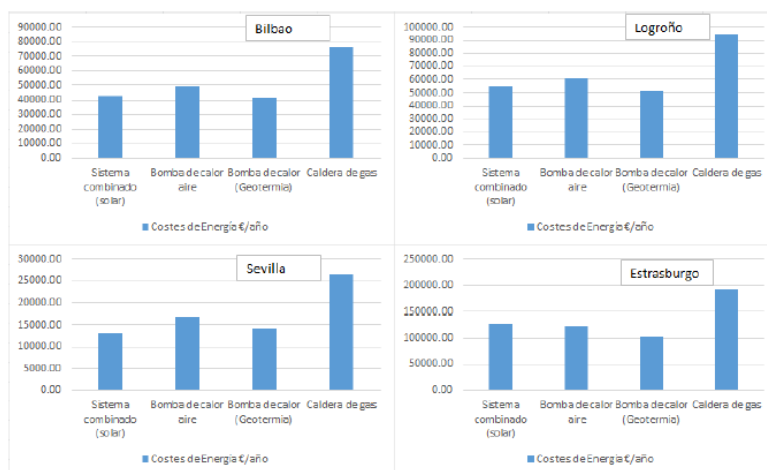
Se ha mencionado previamente que este trabajo es una continuación a (14) y (15) en los que ya se realizó la correspondiente rentabilidad de dichos proyectos que incluían fachadas solares no acristaladas en conjunto con sistemas de bombas de calor y DH.

Para el caso de los sistemas que funcionan en conjunto con sistemas de bomba de calor, se realizó el análisis de la rentabilidad comparando estos sistemas híbridos con uno funcionando con caldera de gas.



Gráfica 18 Comparación de precios de distintas instalaciones (14)

Como se puede observar en la imagen anterior, la inversión a realizar en sistemas combinados de bomba de calor con fachadas solares es sustancialmente mayor que la necesaria para calderas de gas. Sin embargo, si se realiza un análisis del coste anual de explotación del sistema, resulta que la fachada solar supone un ahorro bastante grande en las distintas localidades de estudio:



Gráfica 19 Costes de explotación de instalaciones energéticas €/año (14)

Con estos datos se analizaron el PayBack y el NVP de la instalación definidos como:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (67)$$

$$Payback = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Resultado promedio del flujo de caja}} \quad (68)$$

Donde:

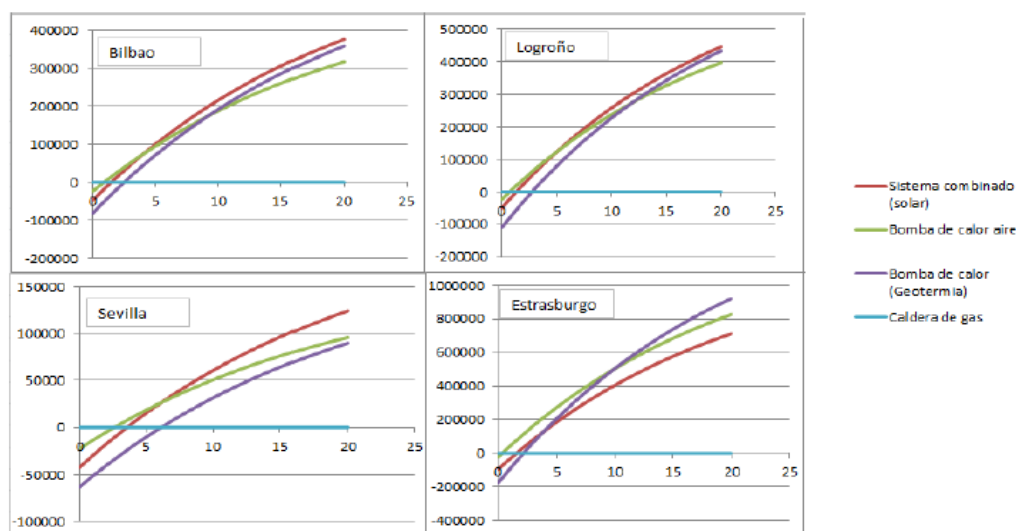
- T es el número de periodos.
- C_t es el flujo de caja en un periodo.
- C₀ es la inversión inicial.
- r es la tasa de descuento.

Con estas definiciones se desarrollan los cálculos correspondientes, de manera que se obtienen los siguientes valores de Payback.

Tabla 23 Valores de payback para cada instalación

| Payback (años) | Sistema combinado (solar) | Bomba de calor aerotérmica | Bomba de calor (Geotermia) | Caldera de gas |
|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
| Bilbao | 2 | 1 | 3 | 0 |
| Logroño | 2 | 1 | 3 | 0 |
| Sevilla | 4 | 3 | 7 | 0 |
| Estrasburgo | 2 | 1 | 3 | 0 |

Por otro lado, en lo referente al NVP se obtuvieron las siguientes gráficas:



Gráfica 20 NVP €/año

Como se puede observar en dichas gráficas, el sistema combinado presenta rentabilidades superiores que la geotermia 20 años en todos aquellos lugares donde el clima es templado y presenta una disponibilidad de recurso solar estable a lo largo del año, es decir en todas las localizaciones estudiadas salvo Estrasburgo.

En comparación con sistemas de aerotermia, se observa que para periodos superiores a 5 años resulta más rentable la inversión en un sistema de fachada solar con bomba de calor con la excepción de Estrasburgo.

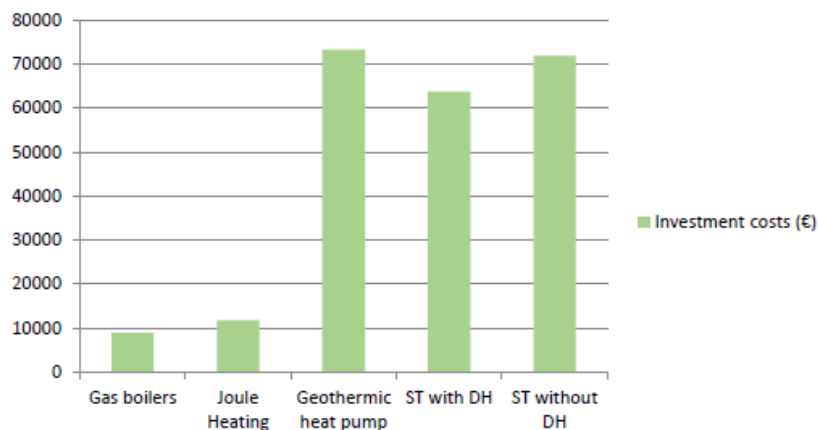
Por lo tanto, si se trae a la memoria el mapa del potencial solar de Europa que se ha mencionado en el contexto (Ilustración 2), podría establecerse una frontera de las áreas del continente en las que este tipo de sistemas resultan realmente interesantes que estaría limitada principalmente a los países mediterráneos de Europa.

Por otro en el análisis realizado en (15) sobre las FSTAs como fuente de aporte a las redes de DH, se ha analizado además el ROI de un proyecto de estas características definido como:

$$ROI = \frac{NPV - C_0}{C_0} \quad (69)$$

El NPV se calculó en este estudio a 20 años para una tasa de descuento del 5%, mientras el ROI se emplea para comparar el beneficio que se espera obtener con la inversión realizada.

En este estudio nuevamente se presenta una gráfica comparativa de inversiones, en este caso comparando con sistemas solares térmicos en funcionamiento con DH:



Gráfica 21 Comparativa de inversiones para distintos modos de generación

Se puede observar que la inversión a realizar es muy similar a la evaluada previamente. Con el beneficio añadido de que, en este caso, el calor generado se puede vender a la red de forma que se generan ingresos adicionales.

Este estudio económico al igual que el de bomba de calor, fue realizado para varias localizaciones diferentes, (Burdeos, Copenhague y Sevilla) y adicionalmente se contemplaron dos casos: obra nueva y rehabilitación de fachada.

En el caso de obra nueva la inversión se reduce respecto del caso de la rehabilitación de fachada por lo que las métricas consideradas salen más positivas como era de suponer. De nuevo la conclusión de rentabilidad que se obtiene es muy similar a la del caso de la bomba de calor, a climas más soleados más sencillo resulta rentabilizar la inversión, por lo que en este caso la instalación de Sevilla es la que mejor se amortiza.

También cabe mencionar el hecho de que pese a ser necesarias inversiones iniciales mayores, también pueden esperarse rentabilidades más altas en el caso de la rehabilitación de edificios ya que las demandas de calor en los edificios antiguos tienden a ser más elevadas y por lo tanto estos sistemas representan un mayor ahorro. Además, se comprueba que para fracciones solares de entre el 0 y el 20 % la rentabilidad se mantiene prácticamente constante descendiendo para valores superiores del 20%, siendo la fracción solar el porcentaje de edificios con FSTA.

Si además de considerar estos dos estudios donde queda demostrada la rentabilidad de las fachadas activas tanto para su uso en instalaciones con bomba de calor como de DH, se procede a realizar una breve evaluación de su potencial de penetración en el mercado actual en España, quedaría demostrado el interés económico que tiene el desarrollo de proyectos de este estilo.

Para ello conviene volver a los datos recogidos en el contexto donde se habla del actual estado del sector de la edificación en Europa. Según el informe de Euroconstruct (13), actualmente el sector de la construcción está en crecimiento y se espera que dicha tendencia se mantenga por lo menos hasta 2021, no solo en los edificios residenciales de nueva construcción sino también en los no residenciales y las rehabilitaciones.

Si a esto le añadimos los datos del informe de FIEC (64)según los cuales en 2017 el sector de la construcción generó 1.625 miles de millones de euros en toda Europa, se puede hacer la estimación de que en 2019 esta suma aumentaría hasta los 2.496 miles de millones de euros y extrapolando la proporción en la que esto se reparte entre rehabilitaciones, obras nuevas residenciales y no residenciales, se obtiene un mercado potencial de aproximadamente 516.535 edificios.

Se ha mencionado también previamente que los sistemas de FSTA, resultan especialmente rentables para las comunidades en las que el porcentaje de implantación sea inferior al 20%, por lo que se considera que no va a darse el caso en el que haya un porcentaje superior a este de edificios que opten por estos sistemas.

Con todo esto y suponiendo un precio de venta de 100€/m² de fachada, estimación que también se ha mencionado ya obtenida de (18), resulta evidente que realizar este tipo de investigaciones es interesante ya que es un mercado no explotado con gran potencial, sobre todo en comparación con el coste de la instalación experimental con el beneficio esperable.

4 Conclusiones

Las FSTAs son una opción muy interesante de cara al futuro para proporcionar ACS y calefacción a las viviendas de una forma sostenible combinando este tipo de sistemas con bombas de calor, DH u otros sistemas similares ya existentes o que puedan surgir. Sin embargo, para que estos sistemas puedan lograr la proliferación deseada, es necesaria la realización de mucho estudio sobre estas tecnologías para conocer en profundidad su funcionamiento, los parámetros que logran su funcionamiento óptimo y las condiciones ambientales que pueden llegar a limitar su actuación.

Es por ello que en este trabajo se ha decidido hacer un análisis en el que se han estudiado los mecanismos de transmisión de calor para diferentes tecnologías, de manera que se pueda tener una visión clara de su posicionamiento en cuanto a su rendimiento en función de las condiciones ambientales. De la comparación entre las tecnologías, se extrae como primera conclusión un ranking de eficiencia de las tecnologías:

- Colector continuo acristalado.
- Colector tradicional acristalado.
- Colector continuo no acristalado.
- Colector continuo revestido.
- Colector no acristalado.
- Colector revestido.

Además cabe destacar también que los modelos acristalados trabajan bien para rangos de temperaturas elevados, que serían impensables para los colectores no acristalados o revestidos que aun así trabajan con diferencias de temperatura que son más que suficientes para su uso con los sistemas para los que están previstos. Además aunque efectivamente el rendimiento es un factor importante, hay que tener en cuenta que si se está buscando la integración en las viviendas los factores económico y estético son importantes y los colectores acristalados son más caros, así como los revestidos facilitan la integración.

En esta línea de integración estética en equilibrio con el rendimiento, presentan a continuación las conclusiones que se han extraído del barrido paramétrico:

- El ancho de la placa es uno de los parámetros de mayor influencia en lo referente a la eficiencia, siendo mejor cuanto menor sea el ancho. Dado que el ancho ideal para la integración según los arquitectos son placas de unos 30 cm, se puede comprobar como ese es un valor para el cual el rendimiento sigue siendo bastante aceptable aunque no sea el óptimo.
- El caudal que circula por el colector es otro de los parámetros más críticos siendo mejor el rendimiento cuanto mayor sea el caudal. Esta subida del rendimiento es bastante asintótica

en cualquier caso, creciendo muy rápidamente hasta llegar a un punto en el que tiende hacia la horizontal. En el diseño de futuros colectores ese será un punto crítico de estudio para la optimización del colector, ya que depende de factores como el tamaño del colector o de la propia tubería.

- El aislante es otro factor relevante, pero las mayores diferencias en cuanto a rendimiento se dan entre la mera existencia o ausencia del mismo. Es cierto que cuanto más aislado, menores pérdidas y mejor rendimiento, pero la diferencia no es especialmente perceptible una vez que el espesor del aislante es suficiente como para cubrir la tubería.
- En cuanto al material de la placa absorbente, dentro del rango estudiado de resistividades no hay demasiada diferencia de rendimiento aunque sí se puede percibir que cuanto mejor conduzca la placa mayor es el rendimiento.

Hecho este análisis que es extensible a todas las geometrías consideradas, queda comentar las conclusiones referentes a los aspectos económicos del proyecto:

- La viabilidad económica de estos sistemas en conjunción con DH o bombas de calor está sobradamente demostrada en trabajos previos (15) (14).
- El mercado potencial existente es más que suficiente para justificar la rentabilidad de la inversión en este tipo de sistemas.

5 Bibliografía

1. **International Energy Agency.** *Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 250.* Paris : International Energy Agency, 2013. 978-92-64-20241-2.
2. **National Geographic.** Energía solar: un potencial por explorar. *National Geographic.* [En línea] National Geographic, 12 de 12 de 2018. [Citado el: 22 de 2 de 2019.] https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/grandes-reportajes/energia-solar_285/5.
3. **Energía solar. *solae-energía.*** [En línea] [Citado el: 25 de 2 de 2019.] <https://solar-energia.net/>.
4. **Richardson, Luke.** Energy sage. *Solar101.* [En línea] Energysage, 3 de Mayo de 2018. [Citado el: 25 de Febrero de 2019.] <https://news.energysage.com/the-history-and-invention-of-solar-panel-technology/>.
5. **Ecolinventos.** Ecolinventos. *Uno de los primeros calentadores solares de la historia.* [En línea] 29 de 12 de 2014. [Citado el: 7 de 5 de 2019.] <https://ecoinventos.com/calentador-solar/>.
6. **The renewable energy hub.** *History behind solar thermal and solar water heating technology.* [En línea] [Citado el: 25 de Febrero de 2019.] <https://www.renewableenergyhub.co.uk/solar-thermal-information/the-history-of-solar-thermal-technology.html>.
7. **Solar thermal foru building appilcations.** Solar thermal foru building appilcations. *History.* [En línea] [Citado el: 2019 de 2 de 25.] <https://sites.lafayette.edu/egrs352-sp14-solarthermal/understanding-the-technology/history/>.
8. **Eurostat.** Primary production of renewable energy by type. [En línea] 2016 . [Citado el: 27 de febrero de 2019.] <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=ten00081&language=en&toolbox=data>.
9. **European comission.** European Comission. *Maps.* [En línea] [Citado el: 26 de Febrero de 2019.] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index_c.html.
10. ***Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources.*** Angelis-Dimakis, Athanasios, y otros. 15, s.l. : Elsevier, 2011, Renewable and Sustainable Energy Reviews, págs. 1182-1200. 1364-0321.
11. ***An assessment of the regional potential for solar power generation.*** Perpiña Castillo, Carolina, Batistae Silva, Felipe y Lavalle, Carlo. 88, s.l. : Elsevier, 24 de Octubre de 2015, Energy Policy, págs. 86-99. 0301-4215.

12. European Comission. European Comission. *Buildings*. [En línea] [Citado el: 26 de febrero de 2019.] <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings>.
13. ITEeC. Euroconstruct Noviembre 2018. [En línea] 2018. [Citado el: 26 de Febrerp de 2019.] <https://itec.es/servicios/estudios-mercado/euroconstruct-sumario-ultimo-informe/>.
14. Palacios, Marina. *Integración de sistemas solares no acristalados en el marco de sistemas combinados aislados*. Bilbao : s.n., 2018.
15. Lumbreras, Mikel. *Integración de sistemas solares en el marco de redes de calor de distrito de baja temperatura*. Bilbao : s.n., 2018.
16. IDAE. *Impacto de la Energía Solar Térmica en la calificación energética de los edificios*. Madrid : s.n., 2017.
17. *Towards an improved architectural quality of building integrated*. Munari, Maria Cristina y Roecker, Christian. 2007, *Solar Energy* 81, págs. 1140-1116.
18. *Review and analysis of solar thermal facades*. O'Hegarty, Richard, Kinnane, Oliver y McCormack, Sarh J. 135, Dublin : Elsevier, 2016, *Solar Energy*, págs. 408-422.
19. OpenLearn. OpenLearn. [En línea] [Citado el: 28 de febrero de 2019.] <https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=73759§ion=7>.
20. Stinckney, B. y Soifer, B. solarprofessional.com. [En línea] 21 de Octubre de 2018. https://solarprofessional.com/articles/products-equipment/solar-heating/solar-thermal-hydraulics?v=disable_pagination&nopaging=1.
21. *A state of art review on the performance of transpired solar collector*. Shuklaa, Ashish, y otros. 6, s.l. : Elsevier, 28 de 4 de 2012, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, págs. 3975–3985. 1364-0321.
22. *Transpired Solar Collector Walls*. Riegger, Charlene. 2008.
23. KINEX MEDIA. Solarwall. [En línea] Conserval. [Citado el: 9 de 11 de 2018.] www.solarwall.com.
24. Conserval. SolarWall. *Solar Air Heating*.
25. —. SolarWall 2 Stage. *High performane solar air heating*.
26. Cellcode. *Diy Solar Batch Preheaters*. [En línea] <https://cellcode.us/quotes/diy-solar-batch-preheaters.html>.

27. Efimarket. *Kit termosifón de tubo de vacío ENERA-2 ACS solar 180l*. [En línea] [Citado el: 28 de Febrero de 2019.] <https://www.efimarket.com/kit-termosifon-de-tubo-de-vacio-enera-2-ac-s-solar-180l>.
28. eNGineering. [En línea] [Citado el: 28 de febrero de 2019.] <https://goo.gl/images/zWzCsV>.
29. Facias. Solar Water Heater Plans. *Facias*. [En línea] [Citado el: 28 de Febrero de 2019.] <https://facias.org/gallery/solar-water-heater-plans.html>.
30. Cointra. ¿Qué es una instalación de calefacción de baja temperatura? [En línea] [Citado el: 21 de Diciembre de 2018.] <https://www.cointra.es/una-instalacion-calefaccion-baja-temperatura/>.
31. Capsolar cst. Energía Solar termodinámica. *Capsolar cst*. [En línea] 7 de Julio de 2018. [Citado el: 28 de febrero de 2019.] <http://www.capsolarcst.com/sobre-nosotros/noticias/100-energia-solar-termodinamica>.
32. Rivas, Paulino. Instalacione sy eficiencia energética. *CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE: CONFORT Y AHORRO ENERGÉTICO*. [En línea] 2019. [Citado el: 7 de mayo de 2019.] <https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/calefaccion-suelo-radiante/>.
33. Ponce, David. AireFrio. *¿Es la bomba de calor del aire acondicionado baja en consumo?* [En línea] [Citado el: 7 de 5 de 2019.] <https://www.airefrio.com/blog/index.php/es-la-bomba-de-calor-del-aire-acondicionado-baja-en-consumo/>.
34. Arrabat, Idoia. calor y frio. [En línea] 22 de Septiembre de 2015. [Citado el: 21 de Diciembre de 2018.] <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor.html>.
35. STP Group company. HYSS - more than a heat pump. *Free energy*. [En línea] [Citado el: 28 de febrero de 2019.] <http://www.free-energy.com/en/hyss>.
36. IMARTEC. ¿Qué es un "District Heating"? [En línea] 30 de 04 de 2014. [Citado el: 21 de 12 de 2018.] <https://www.imartec.es/que-es-un-district-heating/>.
37. *Energy and exergy analysis of prosumers in hybrid energy grids*. Manrique Delgado, Benjamín, y otros. 23 de Mayo de 2017, Building Research & Information. 1466-4321.
38. *Symbiosis between solar technologies in the building envelope*. Tonelli, Chiara y Converso, Stefano. Rome : Conference Proceedings of the 10th ENERGY FORUM, 2014. págs. 161-169.
39. *Modelling and simulation of Building-Integrated solar thermal systems: Behaviour of the coupled building/system configuration*. Lamnatou, Chr., y otros. 48, s.l. : Elsevier, 2015, Renewable and Sustainable Energy Reviews, págs. 178-191. 1364-0321.

40. *Hybridation of architectural systems with energy harvesting & delivery systems*. Garay, Roberto y Elguezabal, Peru. San Sebastian : s.n., 2015.
41. Archclad TM. Archclad. [En línea] 2017. [Citado el: 9 de 11 de 2018.] www.archclad.com.au/cassettepanelsystem/externalcladdingsystem/.
42. Trespa. Paneles de fachada. *Trespa*. [En línea] [Citado el: 28 de Febrero de 2019.] <https://www.trespa.com/es/productinfo-es/trespa-meteon-paneles-para-fachada>.
43. elZinc. elZinc. [En línea] [Citado el: 9 de 11 de 2018.] <https://www.elzinc.es/soluciones/fachadas/panel-composite/>.
44. Tectonica online. Paneles sandwich fonoabsorbentes. *Tectonica online*. [En línea] [Citado el: 28 de febrero de 2019.] http://www.tectonica-online.com/productos/863/fonoabsorbentes_sandwich_paneles_luxsonor/.
45. CONSTRUMÁTICA. Fachadas cerámicas. [En línea] [Citado el: 21 de diciembre de 2018.] https://www.construmatica.com/construpedia/Fachadas_Cer%C3%A1micas#Gres_porcel.C3.A1nico_en_fachadas_ventiladas.
46. Porcelanosa. Fachada ventilada cerámica. *Instituto de secundaria (Dolyston - EEUU)*.
47. jbernardos. naturpiedra. [En línea] [Citado el: 21 de diciembre de 2018.] <http://www.naturpiedra.com/es/fachada-ventilada-en-piedra-natural-la-piel-del-edificio/>.
48. CESAL Cerramientos. CESAL. [En línea] AXARTEC. [Citado el: 21 de Diciembre de 2018.] <https://cerramientosespeciales-cesal.es/productos/revestimiento-de-fachadas/panel-fenolico/>.
49. Montajes Rica Jamisa. Fachada ventilada panel composite fenólico. [En línea] [Citado el: 28 de febrero de 2019.] <http://www.ricajamisa.es/panel-composite-y-fenolico-montajes-rica-jamisa/>.
50. Aluminios Eibar. Sistemas fachada ventilada en Composite. [En línea] [Citado el: 21 de diciembre de 2018.] <http://aluminioeibar.com/panel-composite/>.
51. Munari, Maria Cristina y Roecker, Christian. *SOLABS: Development of a novel solar thermal facade cladding system*. Lausanne : Solar energie and architecture, 2013.
52. Giovanardi, Alessia y RESEARCH, EURAC. *Integrated solar thermal facade*. Trento : UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO, 2012.
53. Energie Solaire SA. *LA TOITURE SOLAIRE AS*. Sierre : s.n.
54. *Expérimentation et modélisation d'un capteur solaire opaque pour préchauffage de l'eau*. Paul Bonnamy, Saed Raji, Jérôme Lopez, Roberto Garay. Anglet : s.n., 2013.



55. **Conceptualización, desarrollo y.** Roberto Garay-Martinez, Beñat Arregi-Goikolea, Paul Bonnamy, Saed Raji, Jérôme Lopez. 4, Derio : s.n., 2017, DYNA, Vol. 92.
56. BASSE. BASSE green technology. [En línea] EMVS, 2014. [Citado el: 10 de 11 de 2018.] <http://www.basse-eu.com/web/home.aspx>.
57. Tata Steel, European Thermodynamics, Tecnalía, EMVS Madrid, Dow Chemical, Nibe AB . *Presentation of main results Physical design and implementation.* [Presentación] s.l. : European Comission, 2016.
58. *Experimentation under real performing conditions of a highly integrable unglazed solar collector into a building.* Elguezabal, P, Garay, Roberto y Martin, K. Derio : Elsevier, 2017, Energy Procedia, Vol. 122, págs. 775-780. 1876-6102.
59. *10.1016/j.egypro.2017.07.395.* D'Antoni, Matteo y Saro, Onorio. 6, s.l. : Elsevier, 2012, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, págs. 3666-3679. 1364-0321.
60. European Aluminium Association. *The Aluminium Automotive Manual.* 2011.
61. The R Foundation. R-project. *What is R?* [En línea] [Citado el: 9 de Abril de 2019.] <https://www.r-project.org/about.html>.
62. Duffie, John A. y Beckam, William A. *Solar engineering of thermal processes.* Madison, Wisconsin : John Wiley & sons, INC., 1980.
63. CYPE Ingenieros, S.A. Generador de precios de la construcción. *España.* [En línea] [Citado el: 10 de 4 de 2019.] <http://www.generadordeprecios.info/>.
64. FIEC. *Key Figures Activity 2017 Construction in Europe.* Brussels : s.n., 2018. 92221016212-42.

Anexo I: normativa aplicable

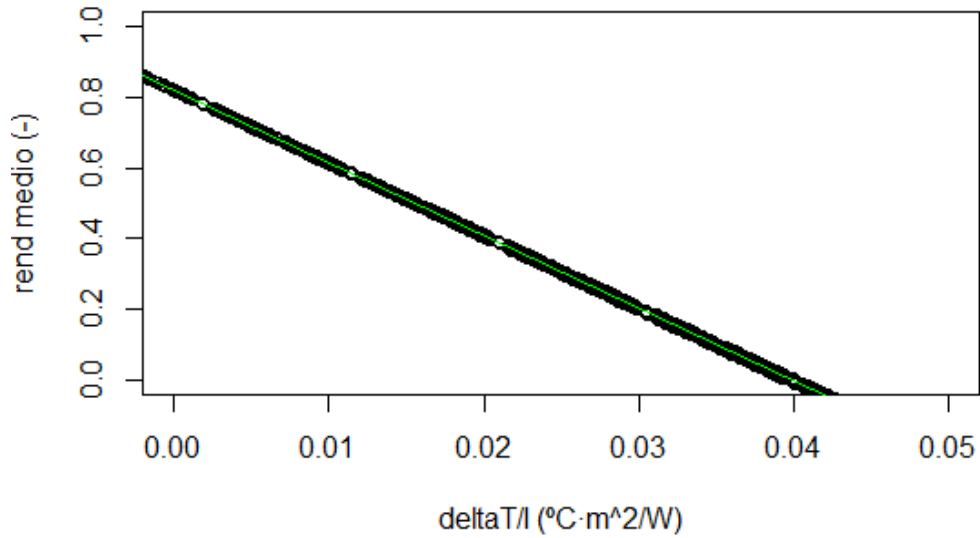
En cuanto a la legislación de requerimientos para viviendas se han utilizado las siguientes normas.

- **NBE-CT del 79: Real Decreto 2429/79, de 6 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación, sobre Condiciones Térmicas en los edificios.**
Mediante Decreto 1.490/75, de 12 de junio, la Administración Pública adoptó las primeras medidas encaminadas a la consecución de un ahorro energético a través de una adecuada construcción de los edificios, haciendo frente así a los problemas derivados del encarecimiento de la energía.
- **CTE: Exigencia básica HE 2: Rendimiento de las instalaciones térmicas (RITE).**
Los edificios dispondrán de instalaciones térmicas apropiadas destinadas a proporcionar el bienestar térmico de sus ocupantes. Esta exigencia se desarrolla actualmente en el vigente Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE, y su aplicación quedará definida en el proyecto del edificio.
- **CTE: Exigencia básica HE 4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria**
En los edificios con previsión de demanda de agua caliente sanitaria o de climatización de piscina cubierta, en los que así se establezca en este CTE, una parte de las necesidades energéticas térmicas derivadas de esa demanda se cubrirá mediante la incorporación en los mismos de sistemas de captación, almacenamiento y utilización de energía solar de baja temperatura, adecuada a la radiación solar global de su emplazamiento y a la demanda de agua caliente del edificio o de la piscina. Los valores derivados de esta exigencia básica tendrán la consideración de mínimos, sin perjuicio de Documento Básico HE Ahorro de Energía 3 valores que puedan ser establecidos por las administraciones competentes y que contribuyan a la sostenibilidad, atendiendo a las características propias de su localización y ámbito territorial.
- **Directiva 2010/31/UE (EPBD) relativa a la eficiencia energética de los edificios** (revisada en la Directiva 2018/844)
- **Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética.**

Anexo II: gráficas

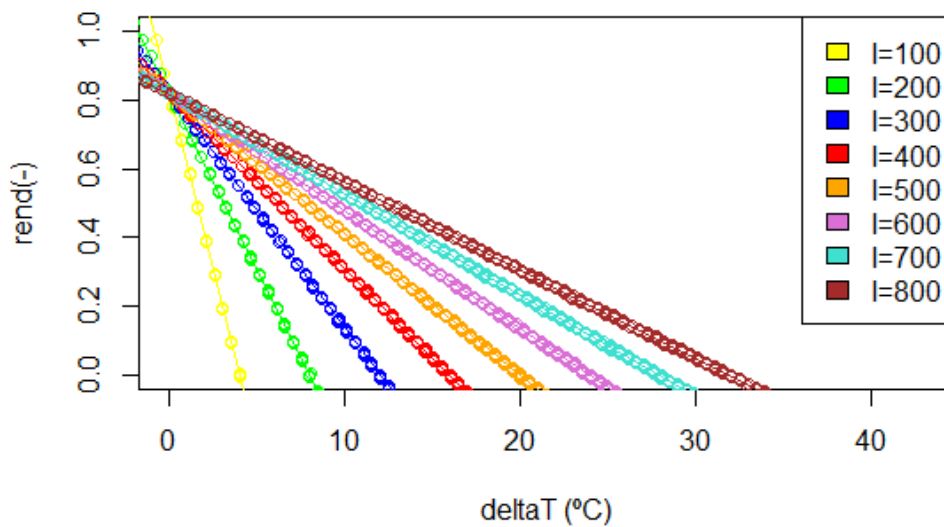
Colector solar revestido

Ecuación característica del colector:

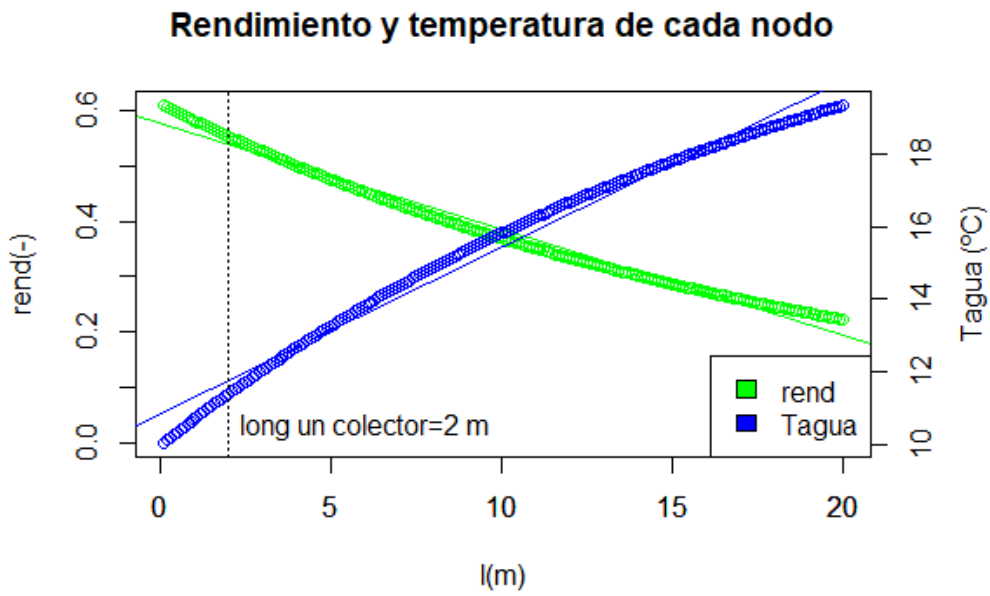


| a_0 (-) | b_0 (W/m ² ·°C) |
|-----------|------------------------------|
| 0,8187182 | -20,5427 |

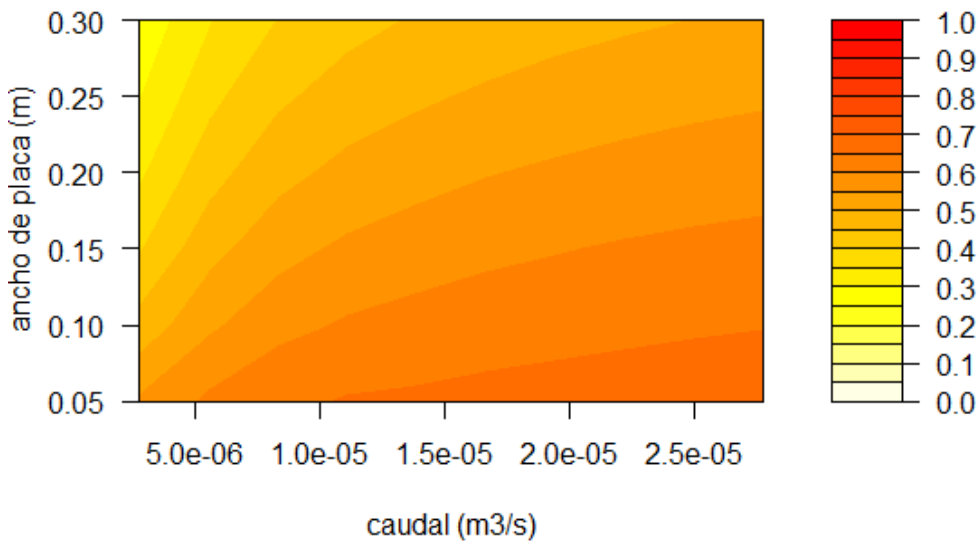
Rendimiento según diferencia de temperatura para varias irradiancias



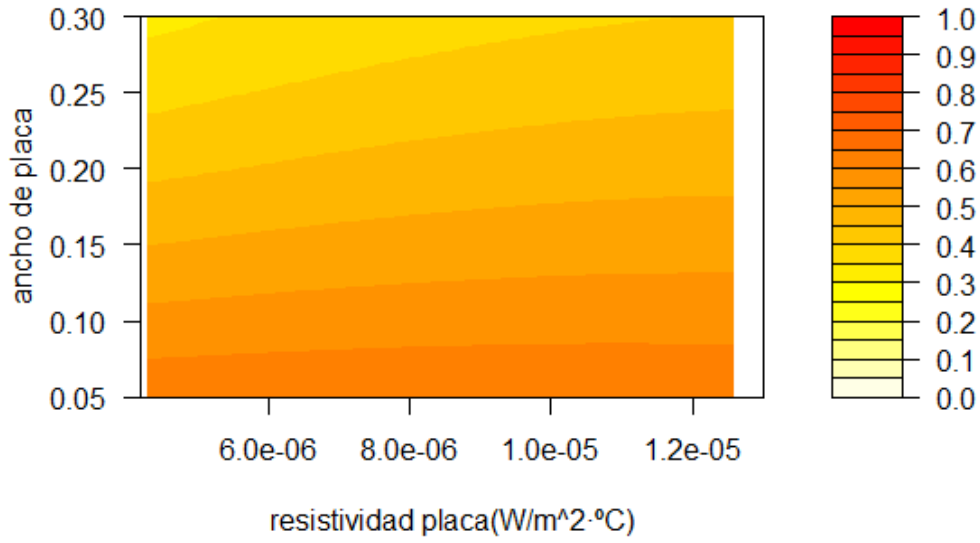
Temperatura y rendimiento según la longitud



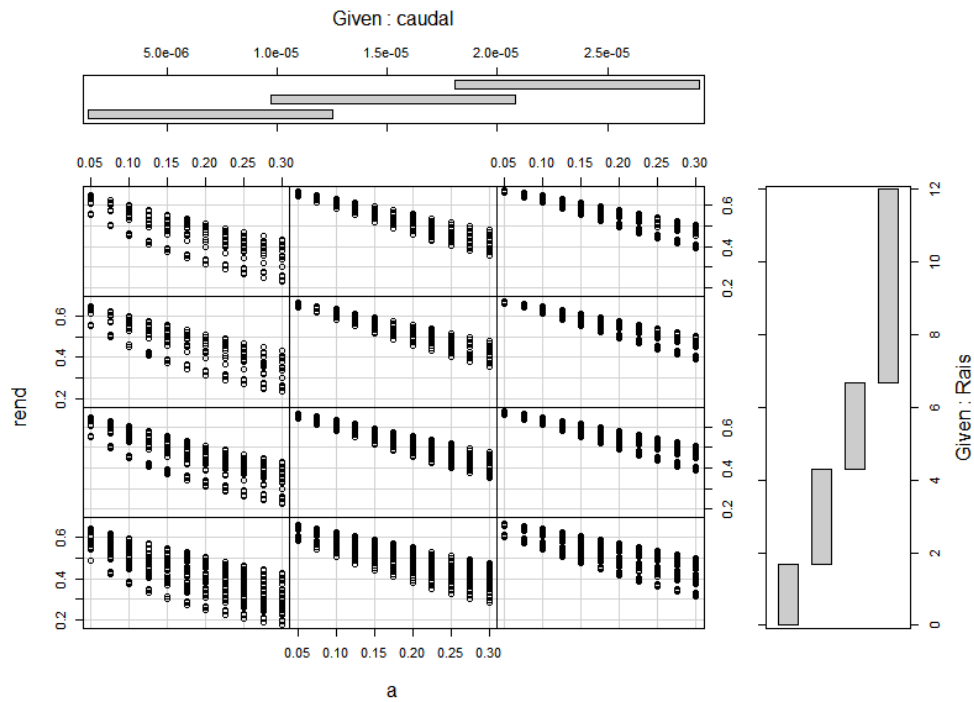
Rendimiento según caudal y ancho:



Rendimiento según resistividad de placa y ancho:

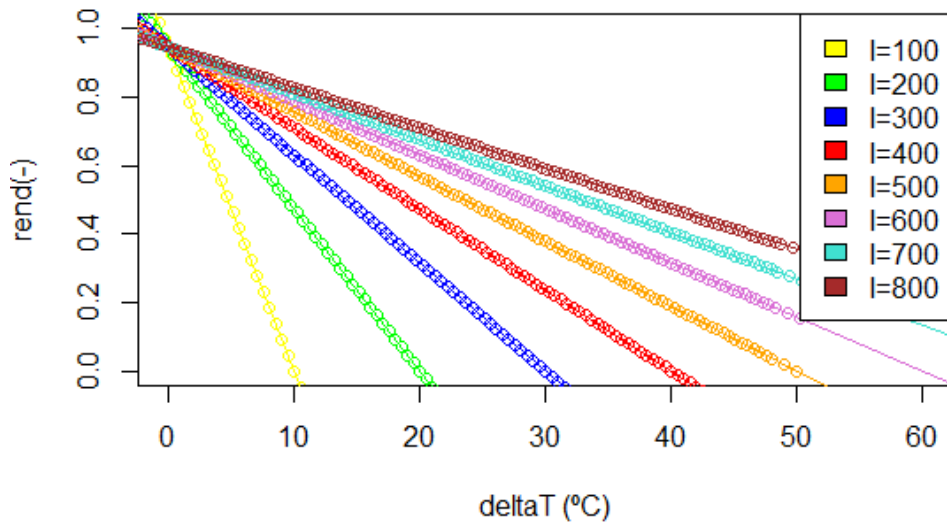


Rendimiento contra ancho para varios intervalos de caudales y de resistividad del aislante:

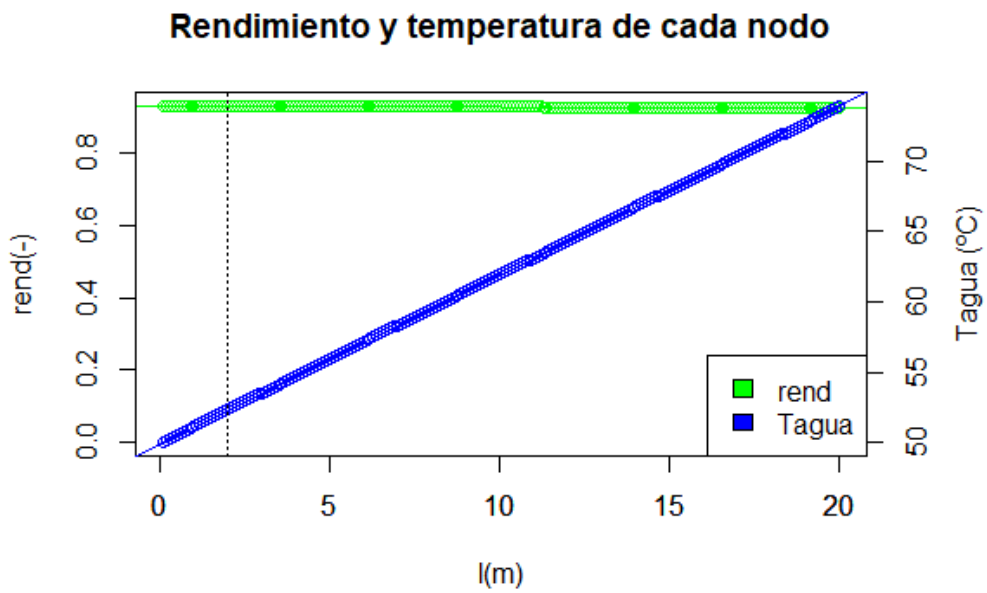


Colector solar acristalado

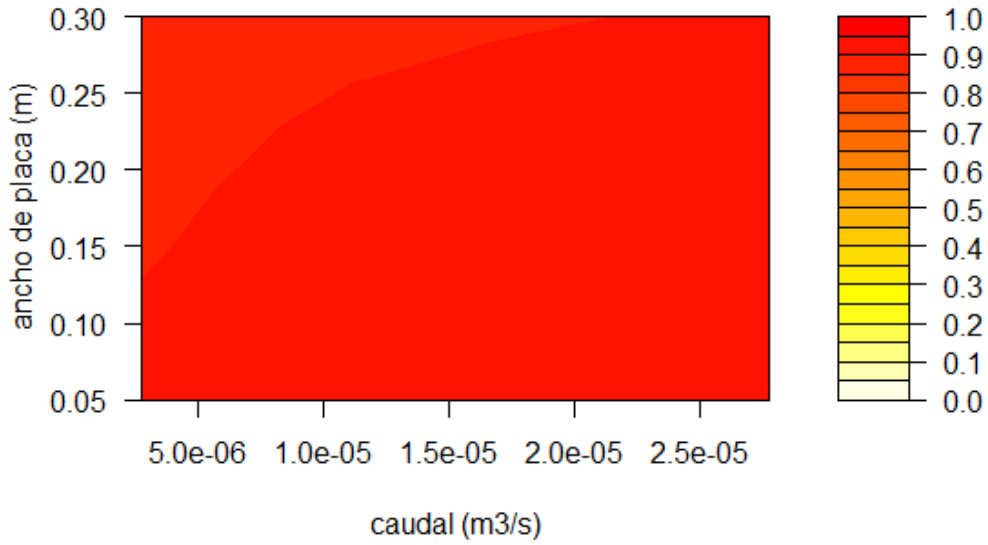
Rendimiento según diferencia de temperatura para varias irradiancias



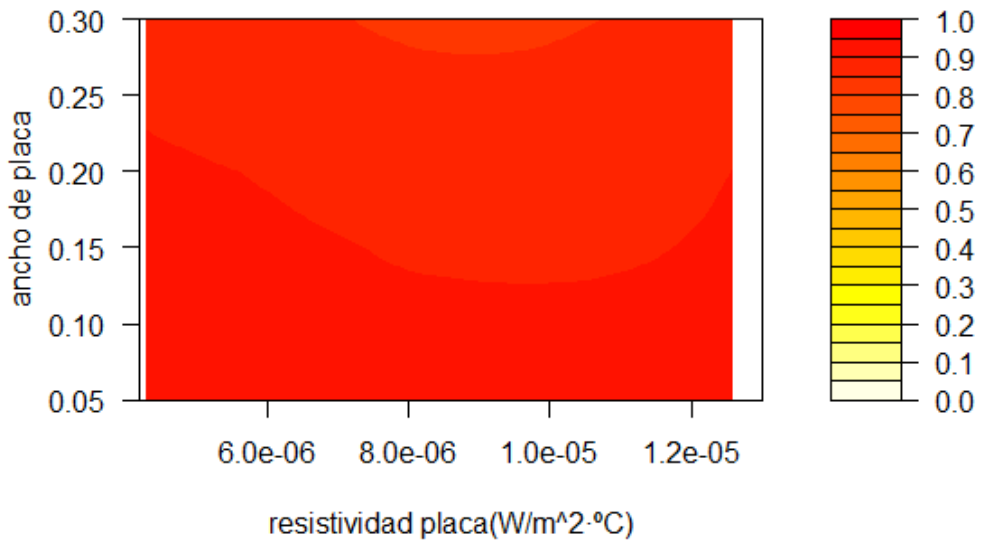
Temperatura y rendimiento según la longitud



Rendimiento según caudal y ancho:

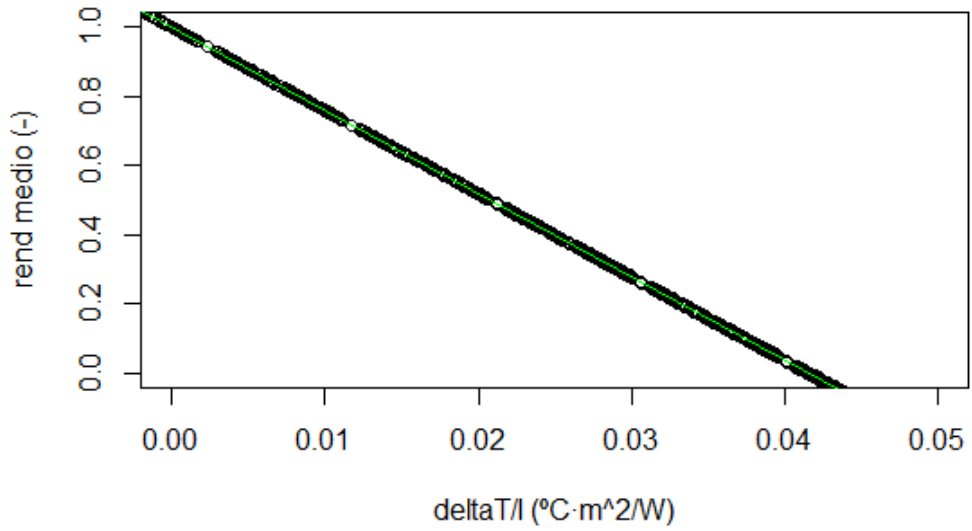


Rendimiento según resistividad de placa y ancho:



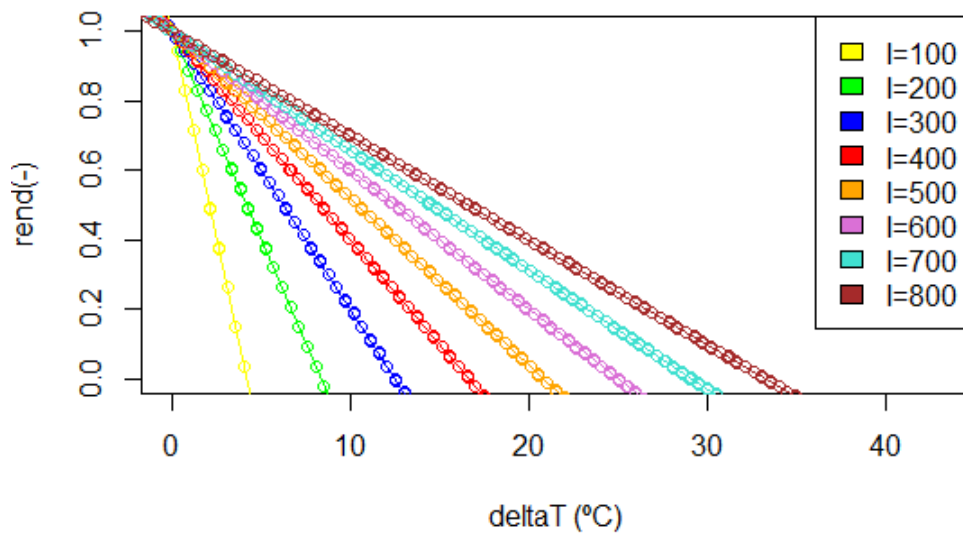
Colector solar continuo no acristalado

Ecuación característica del colector:



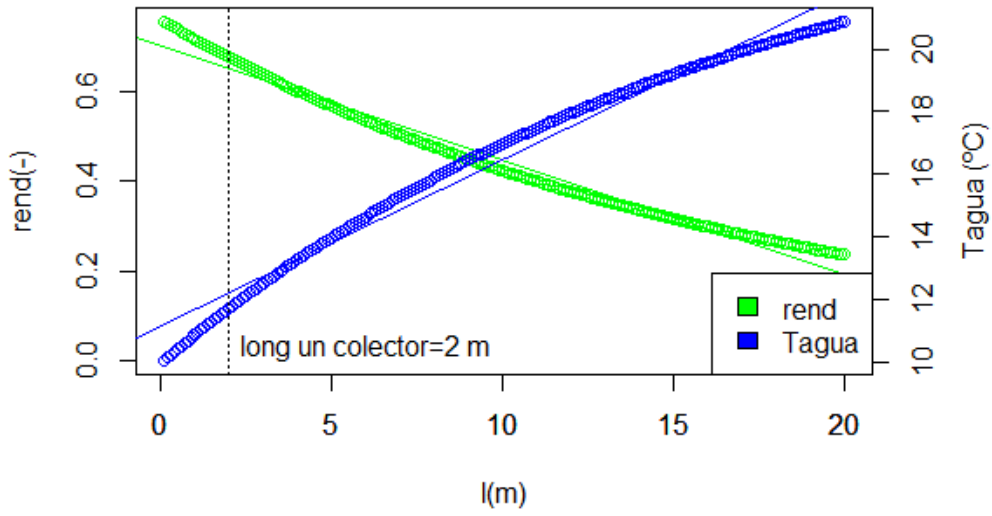
| a_0 (-) | b_0 (W/m ² ·°C) |
|-----------|------------------------------|
| 0,9640211 | -23,204 |

Rendimiento según diferencia de temperatura para varias irradiancias

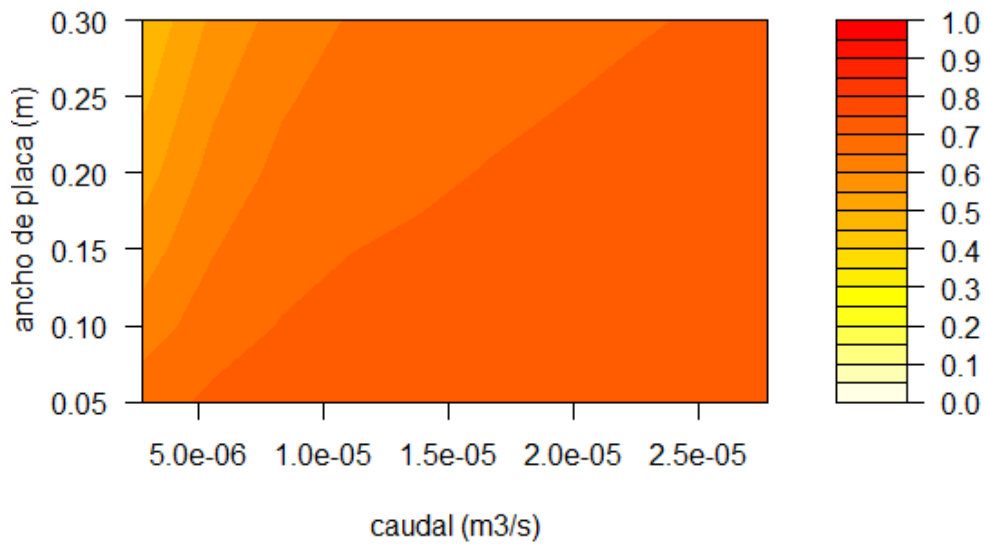


Temperatura y rendimiento según la longitud

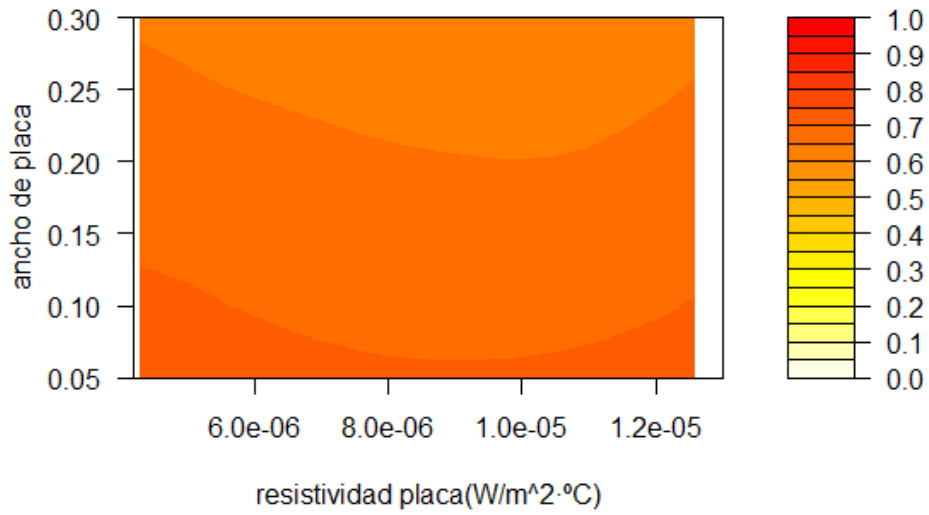
Rendimiento y temperatura de cada nodo



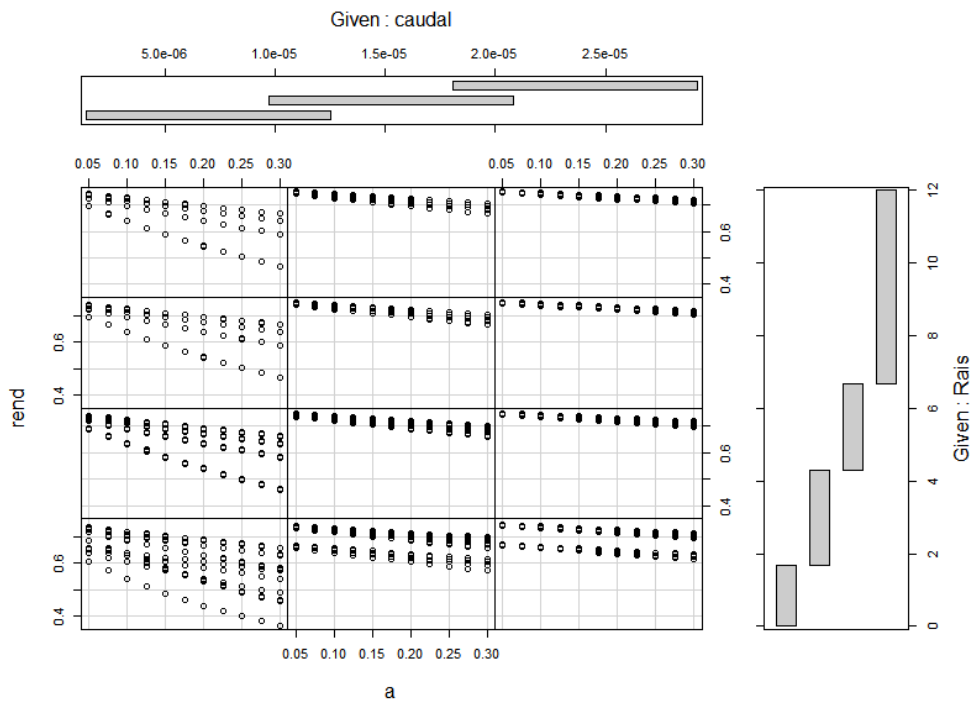
Rendimiento según caudal y ancho:



Rendimiento según resistividad de placa y ancho:

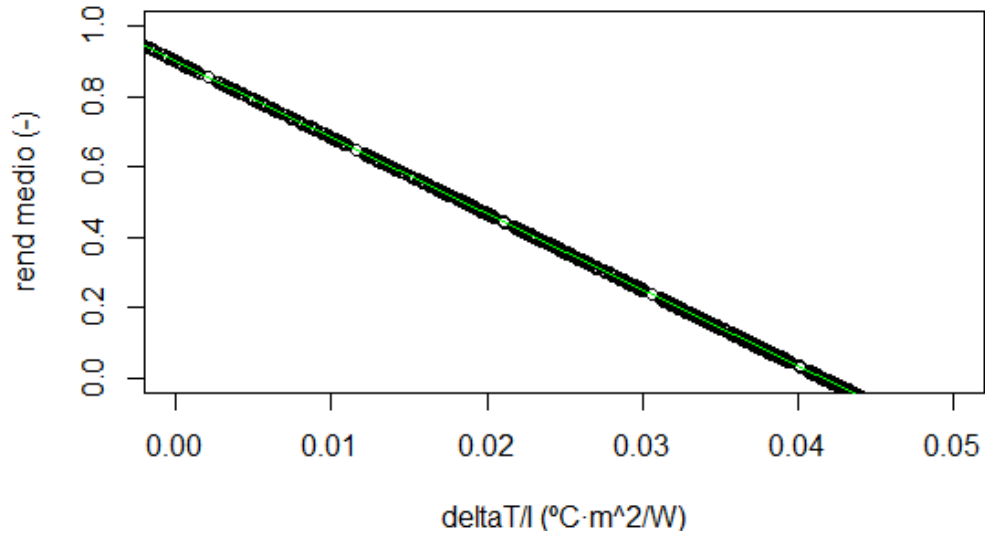


Rendimiento contra ancho para varios intervalos de caudales y de resistividad del aislante:



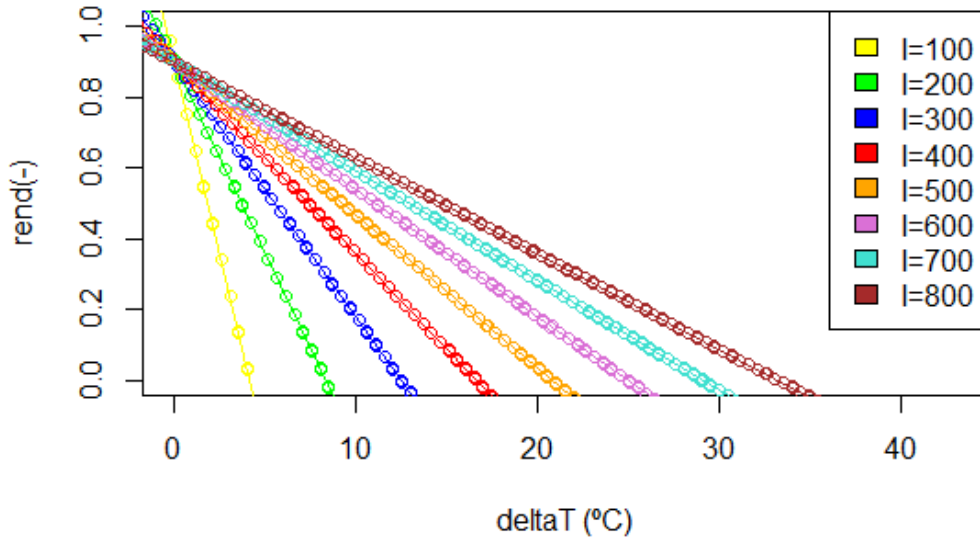
Colector solar continuo revestido

Ecuación característica del colector:

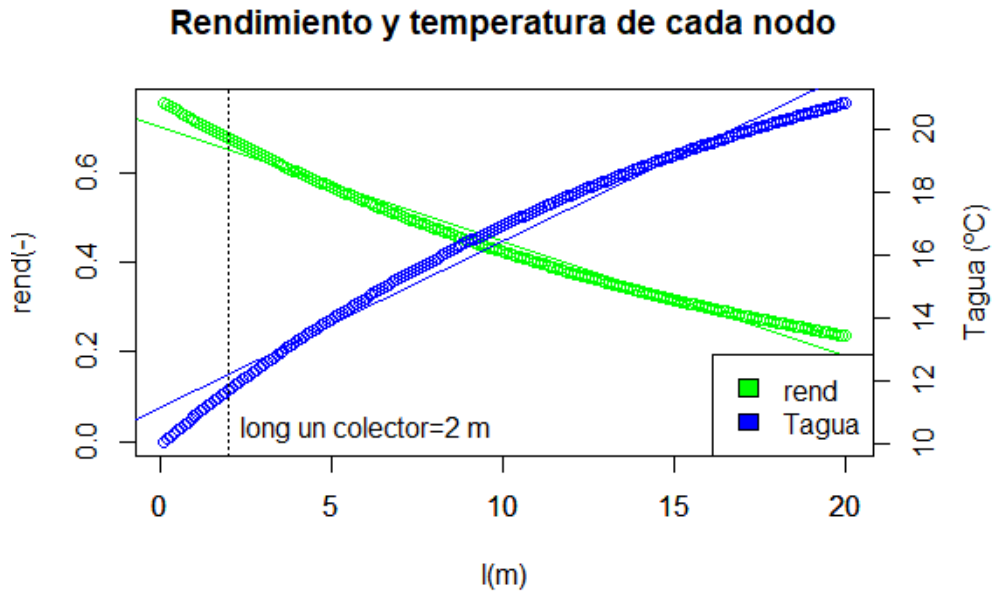


| a_0 (-) | b_0 (W/m ² ·°C) |
|-----------|------------------------------|
| 0,8976742 | -21,60685 |

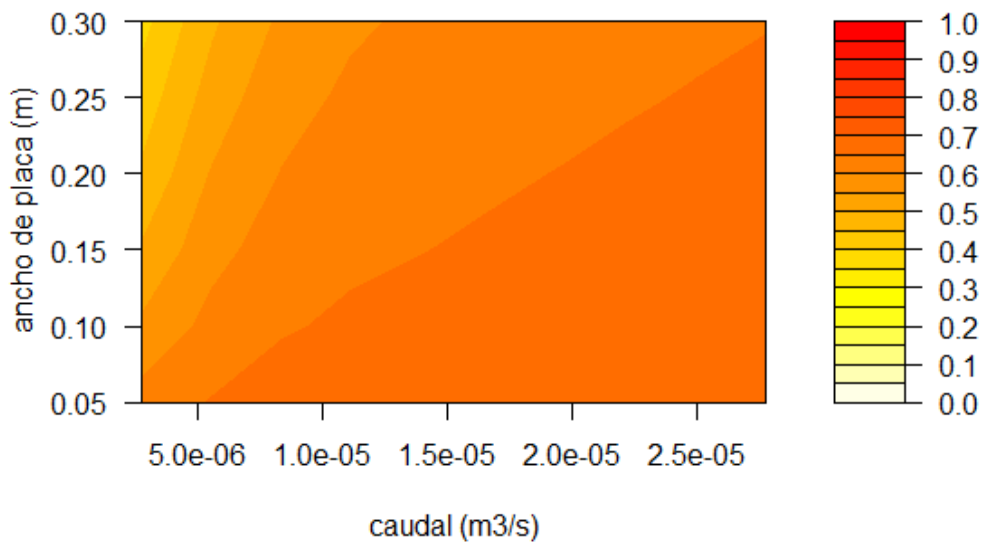
Rendimiento según diferencia de temperatura para varias irradiancias



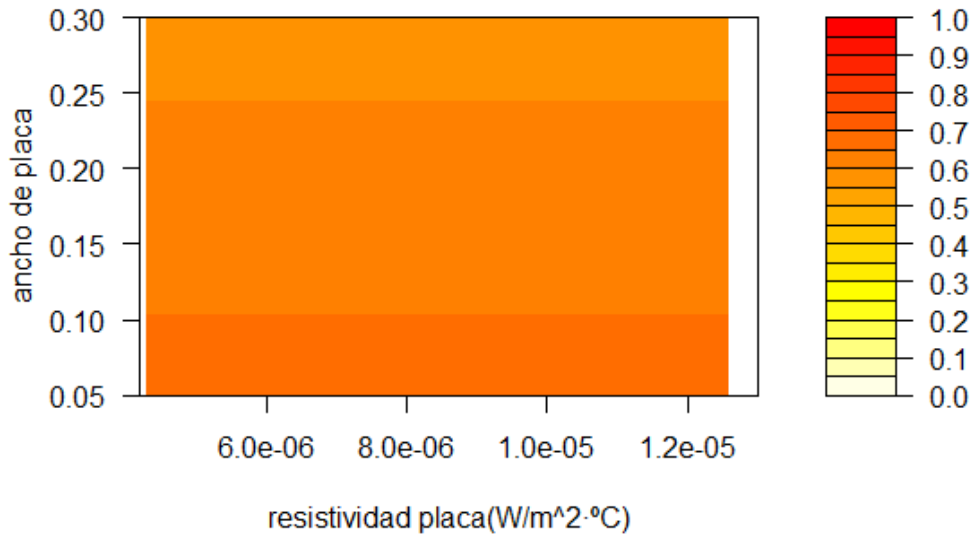
Temperatura y rendimiento según la longitud



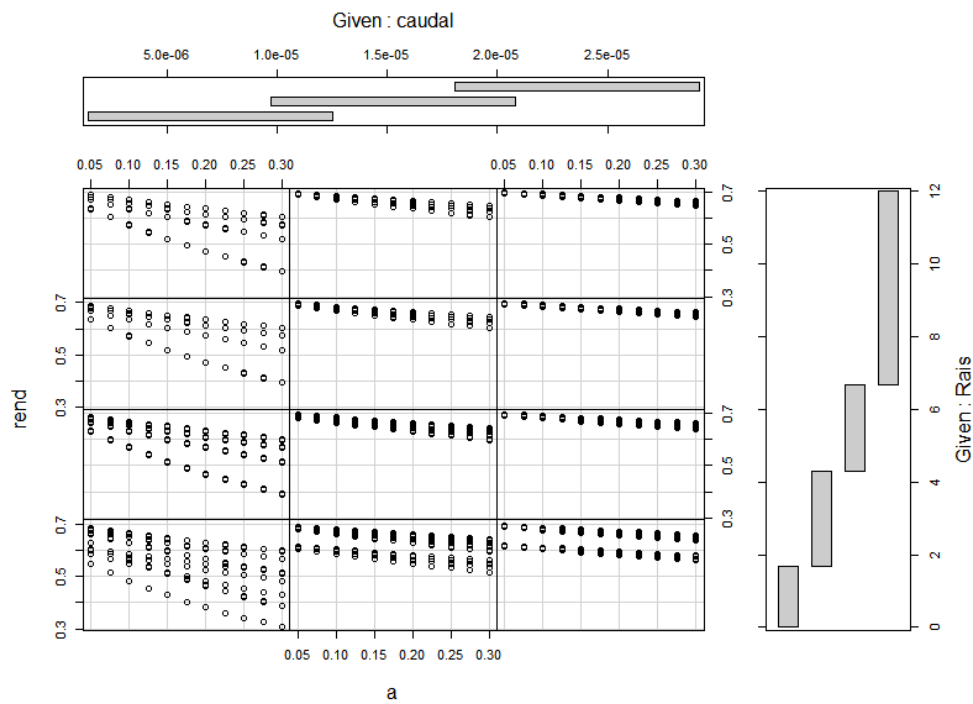
Rendimiento según caudal y ancho:



Rendimiento según resistividad de placa y ancho:

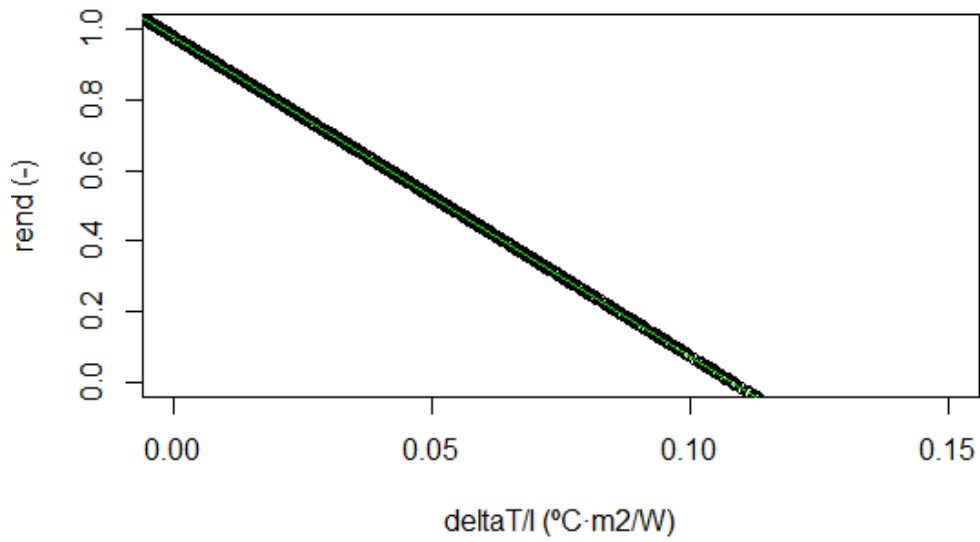


Rendimiento contra ancho para varios intervalos de caudales y de resistividad del aislante:



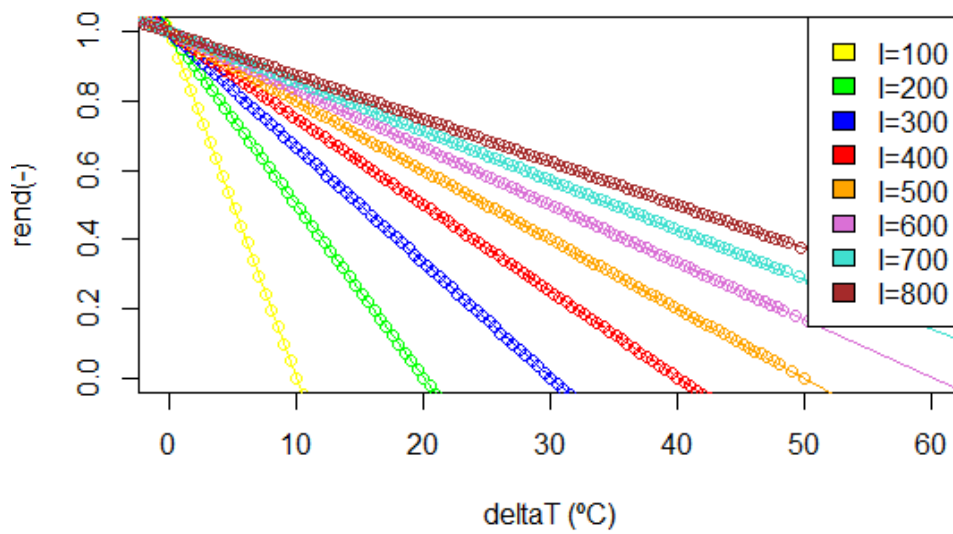
Colector solar continuo acristalado

Ecuación característica del colector:



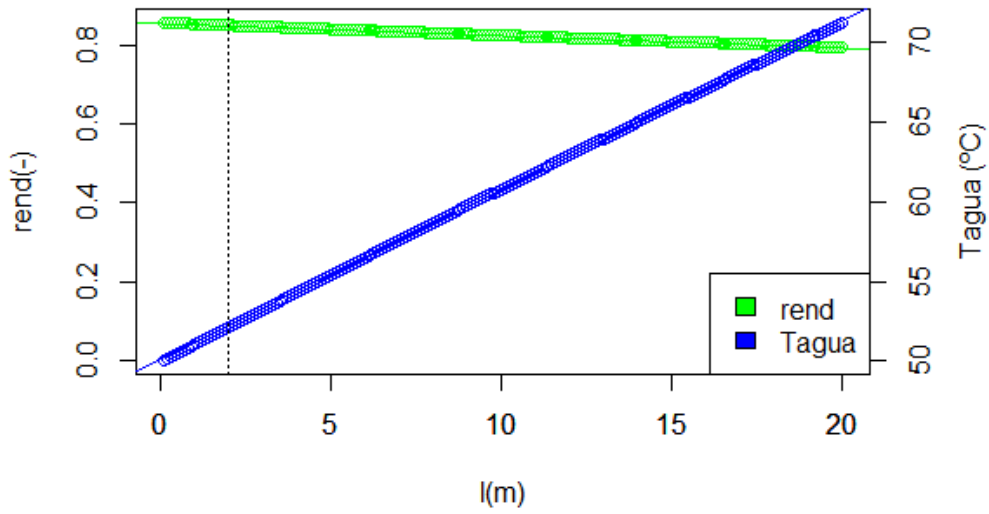
| a_0 (-) | b_0 (W/m ² ·°C) |
|-----------|------------------------------|
| 0,9762352 | -9,036881 |

Rendimiento según diferencia de temperatura para varias irradiancias

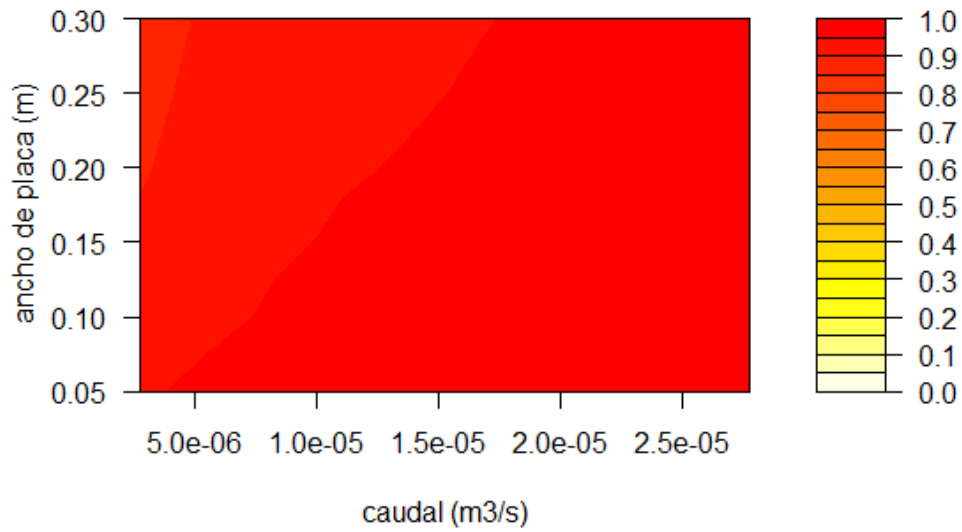


Temperatura y rendimiento según la longitud

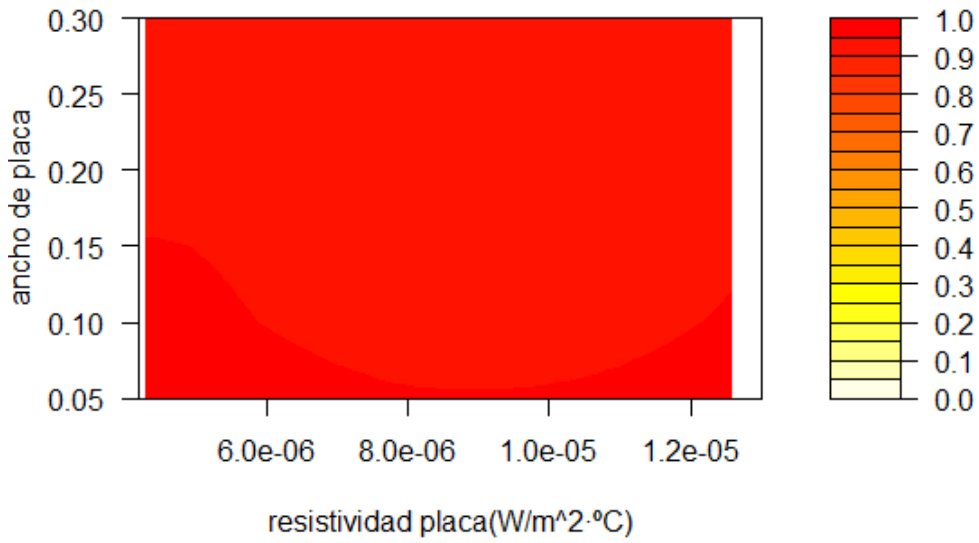
Rendimiento y temperatura de cada nodo



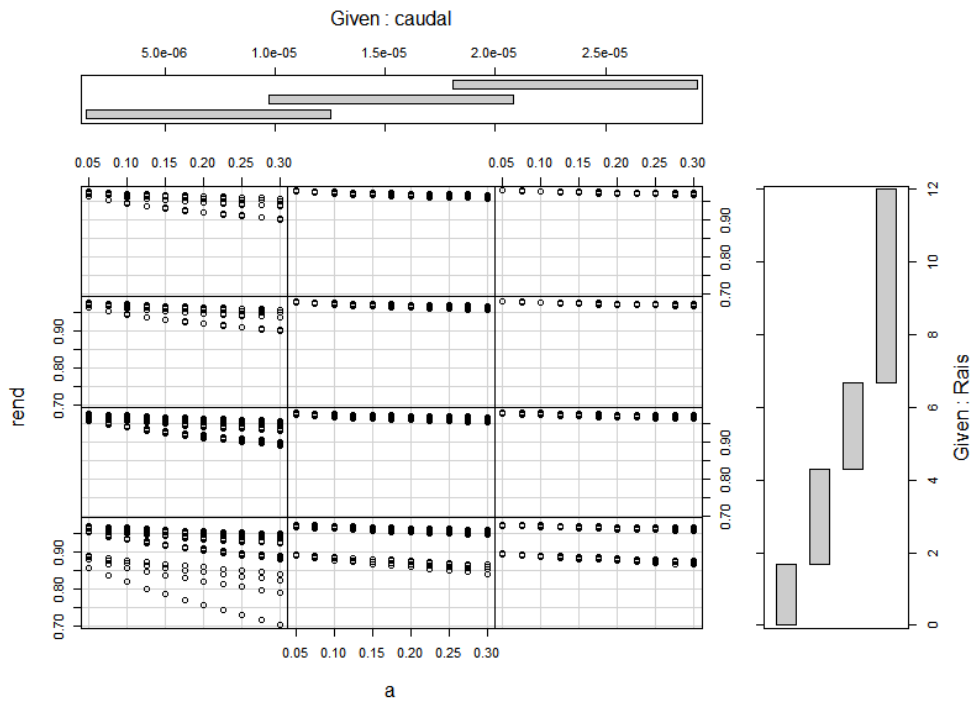
Rendimiento según caudal y ancho:



Rendimiento según resistividad de placa y ancho:

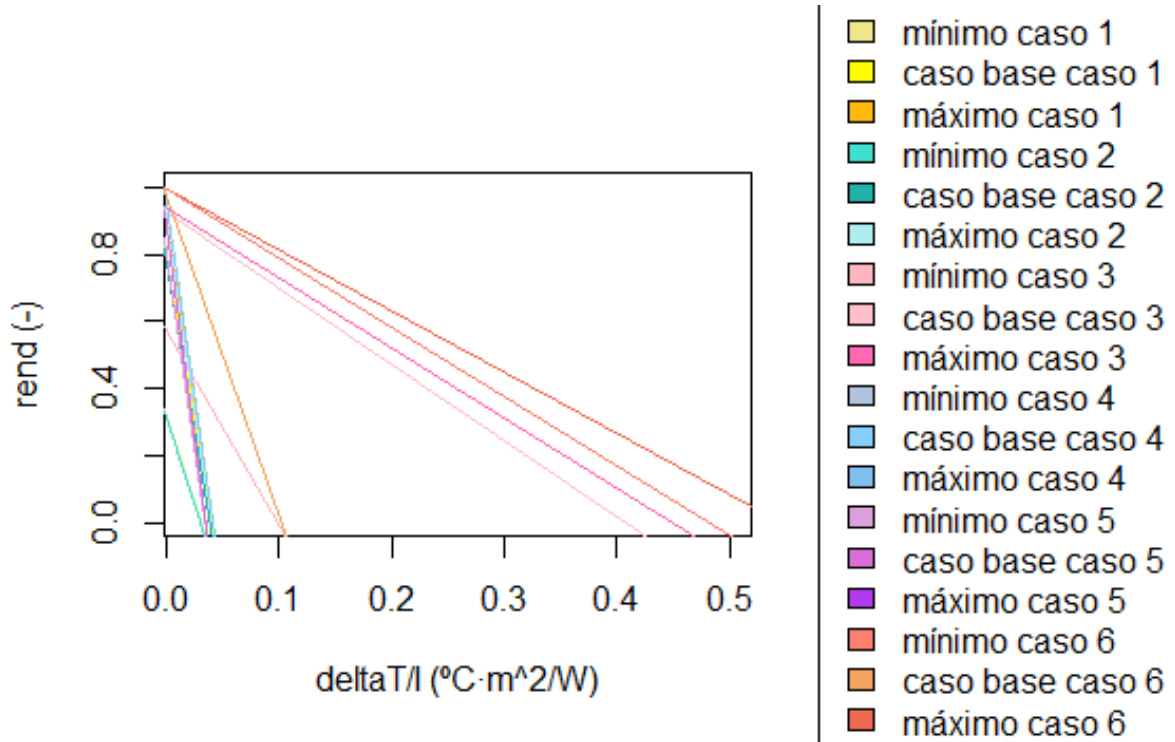


Rendimiento contra ancho para varios intervalos de caudales y de resistividad del aislante:



Comparación de distintas tecnologías

En la siguiente gráfica aparecen las rectas de operación para el caso de rendimientos máximo y mínimo de los considerados en el barrido de datos comparados con el caso base.



Anexo III: Código

Se presenta a continuación el código programado para los cálculos del caso 1. Los demás casos son similares pero con las modificaciones correspondientes:

Entrada de datos

$T_a <- 5$ # Temperatura ambiente (°C)

$I <- 500$ # Irradiancia (W/m²)

$\alpha <- 0.85$ # absortividad

$T_{sky} <- 255$ # Temperatura cielo (K)

$\sigma <- 5.67 * 10^{-8}$ # constante de Boltzman (W/m²K⁴)

$v <- 4$ # velocidad del viento (m/s)

"Placa absorcion"

$e_p <- 3 * 10^{-3}$ # espesor de la placa de aluminio (m)

$k_p <- 237$ # conductividad del aluminio de la placa (W/m°C)

$h_{ext} <- 4 + 4 * v$ # coeficiente de conveccion de la parte delantera (W/m²°C)

$\epsilon <- 0.07$

$a <- 100 * 10^{-3}$ # anchura de la placa (m)

$L <- 20$ # logitud total de la placa (m)

$l <- 10 * 10^{-2}$ # longitud del primer tramo (m)

$N <- L / l$ # numero nodos

$n <- 1$

$A <- l * a$ # area del tramo (m²)

"Tuberia"

$d_{in} <- 8 * 10^{-3}$ # diametro interior de la tuberia (m)

$r_{in} <- d_{in} / 2$

$d_{out} <- 10 * 10^{-3}$ # diametro exterior de la tuberia (m)

$k_t <- 401$ #conductividad del cobre de la tubería (W/m°C)

$r_{out} <- d_{out}/2$

$function_sol <- function(x) r_{out} - \sqrt{r_{out}^2 - x^2}$

$intd_sol <- integrate(function_sol, -r_{out}, r_{out})$

$e_sol <- intd_sol[["value"]]$

$r_m <- (r_{in} + r_{out})/2$

"Aislante"

$e_{ais} <- 300 \cdot 10^{-3}$ #espesor del material aislante (m)

$k_{ais} <- 0.025$ #conductividad del poliuretano (W/m°C)

$h_{tras} <- 7$ #coeficiente de convección del trasdos (W/m²°C)

"Agua"

$v_{agua} <- (30/1000)/3600$ #caudal de agua (m³/s)

$\rho_{agua} <- 999.7$ #densidad del agua (kg/m³)

$m_{agua} <- v_{agua} \cdot \rho_{agua}$ #caudal masico de agua (kg/s)

$c_e <- 4.188$ #calor especifico del agua (kJ/kg°C)

$T_{aguain} <- 10$ #temperatura agua entrante a la placa (°C)

$q_{aguatot} <- 0$ #calor total contenido en el agua (W)

$T_{agua} <- T_{aguain}$ #Temperatura media del agua en el tramo

"Calculo del coeficiente de convección del agua"

$\mu <- 0.0014$ #viscosidad dinamica del agua (kg/m·s)

$k_{agua} <- 0.58$ #conductividad termica del agua (W/m°C)

$c_{agua} <- v_{agua} / (\pi \cdot d_{in}^2 / 4)$ #velocidad del agua en la tubería (m/s)

$Re_L <- \rho_{agua} \cdot c_{agua} \cdot l / \mu$ #numero de Reynolds

$Pr <- \mu \cdot (c_e \cdot 1000) / k_{agua}$ #Numero de Prandtl

$Nu < 0.023 \cdot Re_L^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$ # Forma empírica número de Nusselt para convección forzada en régimen turbulento

$h_{agua} < (Nu / (Re_L \cdot Pr)) \cdot (\rho_{agua} \cdot c_e \cdot 1000) \cdot c_{agua}$ # coeficiente de convección del agua (W/m²·°C)

Aplicación 1^{er} Principio de la termodinámica

"RESISTIVIDADES TÉRMICAS"

$U_b < 1 / (e_p / k_p + e_{ais} / k_{ais} + 1 / h_{tras})$

$U_t < h_{ext} + \sigma \cdot \epsilon \cdot ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a)$

$U_L < U_b + U_t$

$m < \sqrt{U_L / (k_p \cdot e_p)}$

$R_{agua} < 1 / (h_{agua} \cdot \pi \cdot r_{in})$

$function_R_4 < function(x) 1 / h_{tras} + (r_{out} + (e_{ais} - d_{out}) - (r_{out}^2 - x^2)^{0.5}) / (k_{ais} \cdot r_m^2) + \log(d_{out} / d_{in}) / ((\pi / 2) \cdot k_t)$

$intR_4 < integrate(function_R_4, r_{out}, r_{out})$

$R_4 < intR_4[["value"]]$

$R_{13} < e_p / (k_p \cdot d_{out}) + (e_{sol} / d_{out}) / (k_t \cdot d_{out}) + \log(d_{out} / d_{in}) / (k_t \cdot \pi)$

$x < (R_{agua}^2 \cdot (R_4 + 1 / h_{agua})^2) / ((R_{agua}^2 \cdot (R_4 + 1 / h_{agua})^2) - R_{13}^2 \cdot (R_{agua} + (R_4 + 1 / h_{agua}))^2)$

$y < (R_{13}^2 \cdot (R_{agua} + R_4)^2) / (-(R_{agua}^2 \cdot R_4^2) + R_{13}^2 \cdot (R_{agua} + R_4)^2)$

"x * T_p - y * T_a"

$Q < function(T_p) d_{out} \cdot I \cdot (I \cdot \alpha - h_{ext} \cdot (T_p - T_a) - \epsilon \cdot \sigma \cdot ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4)) + (a - d_{out}) \cdot I \cdot (I \cdot \alpha - (1 / (e_{ais} / k_{ais} + e_p / k_p + 1 / h_{tras}) + (h_{ext} + \sigma \cdot \epsilon \cdot ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a))) \cdot (T_p - T_a) \cdot \tanh(\sqrt{(U_b + (h_{ext} + \sigma \cdot \epsilon \cdot ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a))) / (k_p \cdot e_p)}) \cdot (a - d_{out}) / 2) / (\sqrt{(U_b + (h_{ext} + \sigma \cdot \epsilon \cdot ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a))) / (k_p \cdot e_p)}) \cdot (a - d_{out}) / 2) - (h_{agua} \cdot \pi \cdot r_{in} \cdot I \cdot ((x \cdot T_p + y \cdot T_{agua}) - T_{agua}) + I \cdot d_{out} \cdot ((x \cdot T_p + y \cdot T_{agua}) - T_{agua}) / R_4 + \pi \cdot r_m \cdot I \cdot h_{agua} \cdot ((x \cdot T_p + y \cdot T_{agua}) - T_{agua}))$

$q_{agua} < function(T_p) h_{agua} \cdot (\pi \cdot r_{in} \cdot I) \cdot ((T_p \cdot x + T_{agua} \cdot y) - T_{agua})^2$

Evolución en los nodos

```
while (n<N+1)

{T_p<-uniroot(Q,c(-10,45),extendInt = "yes")$root#°C

q_aguanum<-q_agua(T_p)#W

delta_T<-((q_aguanum)/1000)/(c_e*m_agua)# °C

T_aguaout<-T_aguain+delta_T#°C

T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2#°C
```

```
c<-T_p-5
```

```
d<-T_p+5
```

```
e<-1
```

```
while(e>0)
```

```
{T_p1<-T_p#°C
```

```
T_p<-uniroot(Q,c(c,d),extendInt = "yes")$root#°C
```

```
q_aguanum<-q_agua(T_p)#W
```

```
delta_T<-(q_aguanum/1000)/(c_e*m_agua)# °C
```

```
T_aguaout<-T_aguain+delta_T#°C
```

```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2
```

```
e<-Q(T_p)}
```

Gráficas

```
if(n==1)vdelta_T<-c(delta_T)
```

```
else vdelta_T<-rbind(vdelta_T,delta_T)
```

```
if(n==1)vT_aguaout<-c(T_aguaout)
else vT_aguaout<-rbind(vT_aguaout,T_aguaout)

if(n==1)vT_agua<-c(T_agua)
else vT_agua<-rbind(vT_agua,T_agua)

if(n==1) vq_aguanum<-c(q_aguanum/A)
else vq_aguanum<-rbind(vq_aguanum,q_aguanum/A)

q_aguatot<-q_aguatot+q_aguanum

rend<-q_aguanum/(l*alpha*I*a)

if(n==1) vrend<-c(rend)
else vrend<-rbind(vrend,rend)

if (n==1)vT_aguain<-c(T_aguain)
else vT_aguain<-rbind(vT_aguain,T_aguain)

T_aguain<-T_aguaout

n<-n+1}

vl<-seq(0.1,20,by=0.1)
```



```
plot(vl,vq_aguanum,xlab="l(m)",ylab="q_agua (W/m^2)",ylim=c(0,max(vq_aguanum)),main =  
"Transmision de calor al agua en cada nodo")  
  
reg.q_agua<-lm(vq_aguanum~vl)  
  
coef.q_agua<-coef(reg.q_agua)  
  
abline(reg.q_agua)  
  
  
par(mar=c(5,4,4,4)+0.1)  
  
plot(vl,vrend,xlab="l(m)",ylab="rend(-)",ylim=c(0,max(vrend)),main="Rendimiento y temperatura de  
cada nodo",col="green")  
  
reg.rend<-lm(vrend~vl)  
  
coef.rend<-coef(reg.rend)  
  
abline(reg.rend,col="green")  
  
  
par(new=TRUE)  
  
plot(vl,vT_agua,xlab="",ylab="",col="blue",yaxt="n")  
  
axis(4,ylim=c(0,max(vT_agua)))  
  
mtext("T_agua (Â°C)",side=4,line=2.5)  
  
reg.T_agua<-lm(vT_agua~vl)  
  
coef.T_agua<-coef(reg.T_agua)  
  
abline(reg.T_agua,col="blue")  
  
abline(h=T_a,lty=3)  
  
text(T_a,paste("Ta=",T_a))  
  
abline(v=2,lty=3)
```

```
text(6,10.5,paste("long un colector=2 m"))
```

```
legend("bottomright",legend=c("rend", "Tagua"),fill=c("green", "blue"))
```

```
points(vl,vT_aguain,col="red")
```

```
reg.T_aguain<-lm(vT_aguain~vl)
```

```
coef.T_aguain<-coef(reg.T_aguain)
```

```
abline(reg.T_aguain,col="red")
```

```
points(vl,vT_aguaout,col="blue")
```

```
reg.T_aguaout<-lm(vT_aguaout~vl)
```

```
coef.T_aguaout<-coef(reg.T_aguaout)
```

```
abline(reg.T_aguaout,col="blue")
```

```
legend("bottomright",legend=c("T_agua", "T_aguain", "T_aguaout"),fill=c("black", "red", "blue"))
```

Barrido datos ambientales

```
load("barridodatosambientales.RData")
```

```
i<-1
```

```
vn<-c(1:20)
```

```
m<-length(datos[,1])
```

```
while (i<m+1)
```

```
{ "DATOS"
```

```
  T_a<-datos[i,2]#Temperatura ambiente (?C)
```



$I < - \text{datos}[i,1]$ # Irradiancia (W/m²)

$\alpha < - 0.85$ # absortividad

$T_{\text{sky}} < - 255$ # Temperatura cielo (K)

$\sigma < - 5.67 \cdot 10^{-8}$ # constante de Boltzman (W/m²K⁴)

$v < - 4$ # velocidad del viento (m/s)

"Placa absorcion"

$e_p < - 3 \cdot 10^{-3}$ # espesor de la placa de aluminio (m)

$k_p < - 237$ # conductividad del aluminio de la placa (W/m²C)

$h_{\text{ext}} < - 4 + 4 \cdot v$ # coeficiente de convección de la parte delantera (W/m²C)

$\epsilon < - 0.07$

$a < - 100 \cdot 10^{-3}$ # anchura de la placa (m)

$L < - 2$ # longitud total de la placa (m)

$l < - 10 \cdot 10^{-2}$ # longitud del primer tramo (m)

$N < - L/l$ # numero nodos

$n < - 1$

$A < - l \cdot a$ # area del tramo (m²)

"Tuberia"

$d_{\text{in}} < - 8 \cdot 10^{-3}$ # diámetro interior de la tubería (m)

$r_{\text{in}} < - d_{\text{in}}/2$

$d_{\text{out}} < - 10 \cdot 10^{-3}$ # diámetro exterior de la tubería (m)

$k_t < - 401$ # conductividad del cobre de la tubería (W/m²C)

```
r_out<-d_out/2
```

```
function_sol<-function(x)r_out-sqrt(r_out^2-x^2)
```

```
intd_sol<-integrate(function_sol,-r_out,r_out)
```

```
e_sol<-intd_sol[["value"]]
```

```
r_m<-(r_in+r_out)/2
```

```
"Aislante"
```

```
e_ais<-300*10^-3#espesor del material aislante (m)
```

```
k_ais<-0.025#conductividad del poliuretano (W/m?C)
```

```
h_tras<-7#coeficiente de conveccion del trasdos (W/m2?C)
```

```
"Agua"
```

```
v_agua<-(30/1000)/3600#caudal de agua (m3/s)
```

```
rho_agua<-999.7#densidad del agua (kg/m3)
```

```
m_agua<-v_agua*rho_agua#caudal masico de agua (kg/s)
```

```
c_e<-4.188#calor especifico del agua (kJ/kg??C)
```

```
T_aguain<-datos[i,3]#temperaturaagua entrante a la placa (?C)
```

```
q_aguatot<-0 #calor total contenido en el agua (W)
```

```
T_agua<-T_aguain#Temperatura media del agua en el tramo
```

```
T_aguain1<-T_aguain
```

```
"Calculo del coeficiente de conveccion del agua"
```

```
mu<-0.0014#viscosidad dinamica del agua(kg/m?s)
```

$k_{\text{agua}} <- 0.58$ #conductividad termica del agua (W/m²C)

$c_{\text{agua}} <- v_{\text{agua}} / (\pi * d_{\text{in}}^2 / 4)$ #velocidad del agua en la tuberia (m/s)

$Re_L <- \rho_{\text{agua}} * c_{\text{agua}} * l / \mu$ #numero de Reynolds

$Pr <- \mu * (c_e * 1000) / k_{\text{agua}}$ #Numero de Prandtl

$Nu <- 0.023 * Re_L^{0.8} * Pr^{0.4}$ #Forma empirica numero de Nusselt para conveccion forzada en regimen turbulento

$h_{\text{agua}} <- (Nu / (Re_L * Pr)) * (\rho_{\text{agua}} * (c_e * 1000) * c_{\text{agua}})$ #coeficiente de conveccion del agua (W/m²C)

"RESISTIVIDADES TÈRMICAS"

$U_b <- 1 / (e_p / k_p + e_{\text{ais}} / k_{\text{ais}} + 1 / h_{\text{tras}})$

$U_t <- (h_{\text{ext}} + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a))$

$U_L <- U_b + U_t$

$m <- \sqrt{U_L / (k_p * e_p)}$

$R_{\text{agua}} <- 1 / (h_{\text{agua}} * \pi * r_{\text{in}})$

$R_2 <- e_p / k_p + e_{\text{ais}} / k_{\text{ais}} + 1 / h_{\text{tras}}$

$\text{function } R_4 <- \text{function}(x)$
 $1 / h_{\text{tras}} + (r_{\text{out}} + (e_{\text{ais}} - d_{\text{out}}) - (r_{\text{out}}^2 - x^2)^{0.5}) / (k_{\text{ais}} * r_m^2) + \log(d_{\text{out}} / d_{\text{in}}) / ((\pi / 2) * k_t)$

$\text{intR}_4 <- \text{integrate}(\text{function } R_4, -r_{\text{out}}, r_{\text{out}})$

$R_4 <- \text{intR}_4[["value"]]$

$$R_{13} < -e_p / (k_p * d_{out}) + (e_{sol} / d_{out}) / (k_t * d_{out}) + \log(d_{out} / d_{in}) / (k_t * \pi)$$

$$x < - (R_{agua}^2 * (R_4 + 1 / h_{agua})^2) / ((R_{agua}^2 * (R_4 + 1 / h_{agua})^2) - R_{13}^2 * (R_{agua} + (R_4 + 1 / h_{agua}))^2)$$

$$y < - (R_{13}^2 * (R_{agua} + R_4)^2) / (-(R_{agua}^2 * R_4^2) + R_{13}^2 * (R_{agua} + R_4)^2)$$

$$"x * T_p - y * T_a"$$

$$Q < - \text{function}(T_p) \quad d_{out} * I * (I * \alpha - h_{ext} * (T_p - T_a) - \epsilon * \sigma * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4)) + (a - d_{out}) * I * (I * \alpha - (1 / (e_{ais} / k_{ais} + e_p / k_p + 1 / h_{tras}) + (h_{ext} + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a))) * (T_p - T_a)) * \tanh(\sqrt{(U_b + (h_{ext} + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a)) / (k_p * e_p)) * (a - d_{out}) / 2}) / (\sqrt{(U_b + (h_{ext} + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a)) / (k_p * e_p)) * (a - d_{out}) / 2}) - (h_{agua} * \pi * r_{in} * I * ((x * T_p + y * T_{agua}) - T_{agua}) + I * d_{out} * ((x * T_p + y * T_{agua}) - T_{agua}) / R_4 + \pi * r_m * I * h_{agua} * ((x * T_p + y * T_{agua}) - T_{agua}))$$

$$q_{agua} < - \text{function}(T_p) \quad h_{agua} * (\pi * r_{in} * I) * ((T_p * x + T_{agua} * y) - T_{agua})^2$$

while (n < N + 1)

{T_p < uniroot(Q, lower = -15, upper = 45, extendInt = "yes")\$root#?C

q_aguanum < -q_agua(T_p)#W

delta_T < -((q_aguanum) / 1000) / (c_e * m_agua)#?C



```
T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C
```

```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2#?C
```

```
c<-T_p-3.5
```

```
d<-T_p+3.5
```

```
e<-1
```

```
while(e>10^-4)
```

```
{T_p1<-T_p#?C
```

```
T_p<-uniroot(Q,lower=c,upper=d)$root#?C
```

```
q_aguanum<-q_agua(T_p)#W
```

```
delta_T<-(q_aguanum/1000)/(c_e*m_agua)#?C
```

```
T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C
```

```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2
```

```
e<-Q(T_p)}
```

```
q_aguatot<-q_aguatot+q_aguanum
```

```
rend<-q_aguanum/(l*alpha*I*a)
```

```
if(n==1)
```

```
{vdelta_T<-c(delta_T)
```

```
vT_aguaout<-c(T_aguaout)
```

```
vT_agua<-c(T_agua)
```

```
vq_aguanum<-c(q_aguanum)
```

```
vrend<-c(rend)
```

```
vT_aguain<-c(T_aguain)
```

```
vT_p<-c(T_p)}
```

```
else {vdelta_T<-rbind(vdelta_T,delta_T)
```

```
vT_aguaout<-rbind(vT_aguaout,T_aguaout)
```

```
vT_agua<-rbind(vT_agua,T_agua)
```

```
vq_aguanum<-rbind(vq_aguanum,q_aguanum)
```

```
vrend<-rbind(vrend,rend)
```

```
vT_aguain<-rbind(vT_aguain,T_aguain)
```

```
vT_p<-rbind(vT_p,T_p)}
```

```
T_aguain<-T_aguaout
```

```
n<-n+1}
```




```
mediarend<-q_aguatot/(alpha*I*L*a)

mediaTagua<-(T_aguain1+T_aguaout)/2

mediaT_p<-mean(vT_p)

diftem<-T_p-T_a

x<-(mediaTagua-T_a)/l

deltaT_ext<-mediaTagua-T_a

if (i==1){vmediarend<-c(mediarend)

  ejex<-c(x)

  vl<-c(l)

  vdeltaT_ext<-c(deltaT_ext)

  barridopornodos<-cbind(vn,l,T_a,vT_aguain,vT_agua,vdelta_T,vT_p,vq_aguanum,vrend)

  tabla<-rbind(x,vrend)

  datosambcaso1<-cbind(l,T_aguain1,T_a,mediaT_p,x,mediarend)}

else {vmediarend<-rbind(vmediarend,mediarend)

  ejex<-rbind(ejex,x)

  vl<-rbind(vl,l)

  vdeltaT_ext<-rbind(vdeltaT_ext,deltaT_ext)

  barridopornodos1<-cbind(vn,l,T_a,vT_aguain,vT_agua,vdelta_T,vT_p,vq_aguanum,vrend)

  barridopornodos<-rbind(barridopornodos,barridopornodos1)

  tabla<-cbind(tabla,rbind(x,vrend))

  datosambcaso1<-rbind(datosambcaso1,cbind(l,T_aguain1,T_a,mediaT_p,x,mediarend))}
```

```
i<-i+1}

colnames(barridopornodos)<-c("n","l","T_a","T_aguain","T_agua","delta_T","T_p","q_agua","rend")

barridopornodos<-data.frame(barridopornodos,row.names = NULL)

#Grafica rendimiento frente deltaT/l

plot(ejex,vmediarend,ylim=c(0,1),xlim=c(0,0.05),ylab="rend medio (-)",xlab="deltaT/l (°C·m^2/W)")

regresion<-lm(vmediarend~ejex)

abline(regresion,col="green")

coef(regresion)

caso_1_sens<-cbind(ejex,vmediarend)

w<-length(ejex)

z<-1

while (z<w+1)

  {if (caso_1_sens[z,1]<0)

    {caso_1_sens<-caso_1_sens[-z,]

    w<-w-1}

  else if (caso_1_sens[z,2]<0)

    {caso_1_sens<-caso_1_sens[-z,]

    w<-w-1}

  else if (caso_1_sens[z,1]>1)

    {caso_1_sens<-caso_1_sens[-z,]
```

```
w<-w-1}

else z<-z+1}

colnames(caso_1_sens)<-c("deltaT/l","rend")

row.names(caso_1_sens)<-c(1:length(caso_1_sens[,1]))

caso_1_sens<-data.frame(caso_1_sens)

caso_1_sens<-caso_1_sens[with(caso_1_sens,order(caso_1_sens$deltaT.l)),]

row.names(caso_1_sens)<-c(1:length(caso_1_sens[,1]))

write.table(caso_1_sens,file="rend vs deltaTl 1.txt")

#Grafica rendimiento vs numero de nodo

m<-length(tabla[1,])

i<-1

while (i<m+1)

{if (tabla[2:N+1,i]<1 && tabla[2:N+1,i]>0&&tabla[1,i]>0)

{if (i==1)

    tablabis<-tabla[,i]

else {tablabis<-cbind(tablabis,tabla[,i])}}

i<-i+1}
```

```
fin<-N+1
```

```
rend.nodos.1<-tablabis[2:fin,1]
```

```
rend.nodos.2<-tablabis[2:fin,2]
```

```
rend.nodos.3<-tablabis[2:fin,3]
```

```
rend.nodos.4<-tablabis[2:fin,4]
```

```
rend.nodos.5<-tablabis[2:fin,5]
```

```
rend.nodos.6<-tablabis[2:fin,6]
```

```
long<-seq(l,L,by=l)
```

```
plot(long,rend.nodos.1,xlim=c(0,L+1),ylim=c(0,1),col="yellow",xlab = "long (m)",ylab="rend(-)")
```

```
lines(loess.smooth(long,rend.nodos.1),col="yellow")
```

```
points(long,rend.nodos.2,col="green")
```

```
lines(loess.smooth(long,rend.nodos.2),col="green")
```

```
points(long,rend.nodos.3,col="blue")
```

```
lines(loess.smooth(long,rend.nodos.3),col="blue")
```

```
points(long,rend.nodos.4,col="red")
```

```
lines(loess.smooth(long,rend.nodos.4),col="red")
```

```
points(long,rend.nodos.5,col="orange")
```

```
lines(loess.smooth(long,rend.nodos.5),col="orange")
```

```
points(long,rend.nodos.6,col="purple")
```

```
lines(loess.smooth(long,rend.nodos.6),col="purple")
```

```
legend("topright",legend =  
c(round(tablabis[1,1],4),round(tablabis[1,2],4),round(tablabis[1,3],4),round(tablabis[1,4],4),round(ta  
blabis[1,5],4),round(tablabis[1,6],4)),fill=c("yellow","green","blue","red","orange","purple"),ncol=1)  
  
coeficientes_rend.nodos<-coefficients(lm(rend.nodos.1~c(1:N)))  
  
coeficientes_rend.nodos<-rbind(coeficientes_rend.nodos,coef(lm(rend.nodos.2~long)))  
  
coeficientes_rend.nodos<-rbind(coeficientes_rend.nodos,coef(lm(rend.nodos.3~long)))  
  
coeficientes_rend.nodos<-rbind(coeficientes_rend.nodos,coef(lm(rend.nodos.4~long)))  
  
coeficientes_rend.nodos<-rbind(coeficientes_rend.nodos,coef(lm(rend.nodos.5~long)))  
  
coeficientes_rend.nodos<-rbind(coeficientes_rend.nodos,coef(lm(rend.nodos.6~long)))  
  
rownames(coeficientes_rend.nodos)<-  
c("deltaT/l=0.001","deltaT/l=0.007","deltaT/l=0.01","deltaT/l=0.02","deltaT/l=0.03","deltaT/l=0.04")  
  
#Gráfica rendimiento frente deltaT para varios valores de l  
  
datosgrafica<-data.frame(vl,vdeltaT_ext,vmediarend,row.names = NULL)  
  
l_100<-datosgrafica[1:546,]  
  
l_200<-datosgrafica[1093:1638,]  
  
l_300<-datosgrafica[2185:2730,]  
  
l_400<-datosgrafica[3277:3822,]  
  
l_500<-datosgrafica[4369:4914,]  
  
l_600<-datosgrafica[5461:6006,]  
  
l_700<-datosgrafica[6553:7098,]  
  
l_800<-datosgrafica[7645:8190,]
```

```
plot(I_100[,2],I_100[,3],xlim=c(0,43),ylim=c(0,1),col="yellow",xlab = "deltaT (°C)",ylab="rend(-)")
abline(lm(I_100[,3]~I_100[,2]),col="yellow")
points(I_200[,2],I_200[,3],col="green")
abline(lm(I_200[,3]~I_200[,2]),col="green")
points(I_300[,2],I_300[,3],col="blue")
abline(lm(I_300[,3]~I_300[,2]),col="blue")
points(I_400[,2],I_400[,3],col="red")
abline(lm(I_400[,3]~I_400[,2]),col="red")
points(I_500[,2],I_500[,3],col="orange")
abline(lm(I_500[,3]~I_500[,2]),col="orange")
points(I_600[,2],I_600[,3],col="orchid")
abline(lm(I_600[,3]~I_600[,2]),col="orchid")
points(I_700[,2],I_700[,3],col="turquoise")
abline(lm(I_700[,3]~I_700[,2]),col="turquoise")
points(I_800[,2],I_800[,3],col="brown")
abline(lm(I_800[,3]~I_800[,2]),col="brown")

colours()

legend("topright",legend = c("I=100","I=200","I=300","I=400","I=500","I=600","I=700","I=800"),fill =
c("yellow","green","blue","red","orange","orchid","turquoise","brown"), ncol=1)

lm_I_100<-lm(I_100[,3]~I_100[,2])
lm_I_200<-lm(I_200[,3]~I_200[,2])
```



```
lm_I_300<-lm(I_300[,3]~I_300[,2])
```

```
lm_I_400<-lm(I_400[,3]~I_400[,2])
```

```
lm_I_500<-lm(I_500[,3]~I_500[,2])
```

```
lm_I_600<-lm(I_600[,3]~I_600[,2])
```

```
lm_I_700<-lm(I_700[,3]~I_700[,2])
```

```
lm_I_800<-lm(I_800[,3]~I_800[,2])
```

```
coeficientes_rend.deltaT<-coefficients(lm_I_100)
```

```
coeficientes_rend.deltaT<-rbind(coeficientes_rend.deltaT,coefficients(lm_I_200))
```

```
coeficientes_rend.deltaT<-rbind(coeficientes_rend.deltaT,coefficients(lm_I_300))
```

```
coeficientes_rend.deltaT<-rbind(coeficientes_rend.deltaT,coefficients(lm_I_400))
```

```
coeficientes_rend.deltaT<-rbind(coeficientes_rend.deltaT,coefficients(lm_I_500))
```

```
coeficientes_rend.deltaT<-rbind(coeficientes_rend.deltaT,coefficients(lm_I_600))
```

```
coeficientes_rend.deltaT<-rbind(coeficientes_rend.deltaT,coefficients(lm_I_700))
```

```
coeficientes_rend.deltaT<-rbind(coeficientes_rend.deltaT,coefficients(lm_I_800))
```

```
rownames(coeficientes_rend.deltaT)<-
```

```
c("I=100","I=200","I=300","I=400","I=500","I=600","I=700","I=800")
```

```
save(datosambcaso1,file="datosambientalescaso1.RData")
```

Barrido datos geométricos

```
"DATOS"
```

```
alpha<-0.85#absortividad
```

```
T_sky<-255#Temperatura cielo (K)
```

```
sigma<-5.67*10^-8#constante de Boltzman (W/m2K4)
```

$v < 4$ # velocidad del viento (m/s)

"Placa absorcion"

$h_{ext} < 4 * v$ # coeficiente de convección de la parte delantera (W/m²?C)

$\epsilon < 0.07$ # emisividad del aluminio

$L < 2$ # longitud total de la placa (m)

$l < 10 * 10^{-2}$ # longitud del primer tramo (m)

$N < L/l$ # numero nodos

$h_{tras} < 7$ # coeficiente de convección del trasdos (W/m²?C)

"Tuberia"

$d_{in} < 8 * 10^{-3}$ # diámetro interior de la tubería (m)

$r_{in} < d_{in}/2$

$d_{out} < 10 * 10^{-3}$ # diámetro exterior de la tubería (m)

$k_t < 401$ # conductividad del cobre de la tubería (W/m?C)

$r_{out} < d_{out}/2$

function_sol < function(x) r_out - sqrt(r_out^2 - x^2)

intd_sol < integrate(function_sol, -r_out, r_out)

e_sol < intd_sol[["value"]]

$r_m < (r_{in} + r_{out})/2$

"Agua"

$\rho_{agua} < 999.7$ # densidad del agua (kg/m³)

$c_e < 4.188$ # calor específico del agua (kJ/kg??C)

$\mu < 0.0014$ # viscosidad dinámica del agua (kg/m?s)



$k_{\text{agua}} <- 0.58$ #conductividad termica del agua (W/m²C)

#CALCULOS CAUDAL

load("caudal.ambiente.RData")

i <- 1

b <- length(caudal.ambiente[,1])

cont_10 <- 1

cont_30 <- 1

cont_50 <- 1

cont_70 <- 1

cont_100 <- 1

while (i < b+1)

{"Ambiente"

T_a <- caudal.ambiente[i,2] #Temperatura ambiente (?C)

I <- caudal.ambiente[i,1] #Irradiancia (W/m²)

"Placa absorcion"

e_p <- 3/1000 #espesor de la placa de aluminio (m)

$k_p <- 237$ #conductividad del aluminio de la placa (W/m°C)

$a <- 100 \cdot 10^{-3}$ #anchura de la placa (m)

$A <- l \cdot a$ #area del tramo(m²)

"Aislante"

$e_{ais} <- 300/1000$ #espesor del material aislante (m)

$k_{ais} <- 0.025$ #conductividad del poliuretano (W/m°C)

"Agua"

$v_{agua} <- \text{caudal.ambiente}[i,4]$ #caudal de agua (m³/s)

$m_{agua} <- v_{agua} \cdot \rho_{agua}$ #caudal masico de agua (kg/s)

$T_{aguain} <- \text{caudal.ambiente}[i,3]$ #temperatura agua entrante a la placa (°C)

$T_{aguain1} <- \text{caudal.ambiente}[i,3]$

$q_{aguatot} <- 0$ #calor total contenido en el agua (W)

$T_{agua} <- T_{aguain}$ #Temperatura media del agua en el tramo

"Calculo del coeficiente de conveccion del agua"

$c_{agua} <- v_{agua} / (\pi \cdot d_{in}^2 / 4)$ #velocidad del agua en la tuberia (m/s)

$Re_L <- \rho_{agua} \cdot c_{agua} \cdot l / \mu$ #numero de Reynolds

$Pr <- \mu \cdot (c_e \cdot 1000) / k_{agua}$ #Numero de Prandtl

Nu<0.023*Re_L^0.8*Pr^0.4#???Forma empirica numero de NUssel para conveccion forzada en regimen turbulento

h_agua<-(Nu/(Re_L*Pr))*(rho_agua*(c_e*1000)*c_agua)#coeficiente de conveccion del agua (W/m2??C)

"RESISTIVIDADES T?RMICAS"

U_b<-1/(e_p/k_p+e_ais/k_ais+1/h_tras)

"U_t<-h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4)/(T_p-T_a)

U_L<-U_b+U_t

m<-sqrt(U_L/(k_p*e_p))"

R_agua<-1/(h_agua*pi*r_in)

R_2<-e_p/k_p+e_ais/k_ais+1/h_tras

function_R_4<-function(x) 1/h_tras+(r_out+(e_ais-d_out)-(r_out^2-x^2)^0.5)/(k_ais*r_m^2)+log(d_out/d_in)/((pi/2)*k_t)

intR_4<-integrate(function_R_4,-r_out,r_out)

R_4<-intR_4[["value"]]

R_13<-e_p/(k_p*d_out)+(e_sol/d_out)/(k_t*d_out)+log(d_out/d_in)/(k_t*pi)

```
x<-(R_agua^2*(R_4+1/h_agua)^2)/((R_agua^2*(R_4+1/h_agua)^2)-  
R_13^2*(R_agua+(R_4+1/h_agua))^2)
```

```
y<-(R_13^2*(R_agua+R_4)^2)/(-(R_agua^2*R_4^2)+R_13^2*(R_agua+R_4)^2)
```

```
"x*T_p-y*T_a"
```

```
Q<-function(T_p) d_out*I*(I*alpha-h_ext*(T_p-T_a)-epsilon*sigma*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4))+(a-  
d_out)*I*(I*alpha-(1/(e_ais/k_ais+e_p/k_p+1/h_tras)+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-  
(T_a+273)^4)/(T_p-T_a)))*(T_p-T_a))*tanh(sqrt((U_b+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-  
(T_a+273)^4)/(T_p-T_a)))/(k_p*e_p))*(a-d_out)/2)/(sqrt((U_b+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-  
(T_a+273)^4)/(T_p-T_a)))/(k_p*e_p))*(a-d_out)/2)-(h_agua*pi*r_in*I*((x*T_p+y*T_agua)-  
T_agua)+I*d_out*((x*T_p+y*T_agua)-T_agua)/R_4+pi*r_m*I*h_agua*((x*T_p+y*T_agua)-T_agua))
```

```
q_agua<-function(T_p) h_agua*(pi*r_in*I)*((T_p*x+T_agua*y)-T_agua)*2
```

```
n<-1
```

```
while (n<N+1)
```

```
{T_p<-uniroot(Q,lower=-12,upper=45)$root#?C
```

```
q_aguanum<-q_agua(T_p)#W
```

```
delta_T<-((q_aguanum)/1000)/(c_e*m_agua)#?C
```

```
T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C
```



```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2#?C
```

```
c<-T_p-5
```

```
d<-T_p+5
```

```
e<-1
```

```
while(e>10^-4)
```

```
{T_p1<-T_p#?C
```

```
T_p<-uniroot(Q,lower=c,upper=d)$root#?C
```

```
q_aguanum<-q_agua(T_p)#W
```

```
delta_T<-(q_aguanum/1000)/(c_e*m_agua)#?C
```

```
T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C
```

```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2
```

```
e<-Q(T_p)}
```

```
q_aguatot<-q_aguatot+q_aguanum
```

```
rend<-q_aguanum/(l*alpha*I*a)
```

```
T_aguain<-T_aguaout
```

```
n<-n+1}
```

```
mediarend<-q_aguatot/(alpha*I*L*a)
```

```
mediaTagua<-(T_aguain1+T_aguaout)/2
```

```
x<-(mediaTagua-T_a)/l
```

```
deltaT_ext<-mediaTagua-T_a
```

```
if (v_agua==10/(3600*1000))
```

```
  {v_agua_10.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
  if (cont_10==1)
```

```
    v_agua_10<-v_agua_10.1
```

```
  else v_agua_10<-rbind(v_agua_10,v_agua_10.1)
```

```
  cont_10<-cont_10+1}
```

```
if (v_agua==30/(3600*1000))
```

```
  {v_agua_30.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
  if (cont_30==1)
```

```
    v_agua_30<-v_agua_30.1
```

```
  else v_agua_30<-rbind(v_agua_30,v_agua_30.1)
```



```
cont_30<-cont_30+1}

if (v_agua==50/(3600*1000))

  {v_agua_50.1<-cbind(mediarend,x)

  if (cont_50==1)

    v_agua_50<-v_agua_50.1

  else v_agua_50<-rbind(v_agua_50,v_agua_50.1)

  cont_50<-cont_50+1}

if (v_agua==70/(3600*1000))

  {v_agua_70.1<-cbind(mediarend,x)

  if (cont_70==1)

    v_agua_70<-v_agua_70.1

  else v_agua_70<-rbind(v_agua_70,v_agua_70.1)

  cont_70<-cont_70+1}

if (v_agua==100/(3600*1000))

  {v_agua_100.1<-cbind(mediarend,x)

  if (cont_100==1)

    v_agua_100<-v_agua_100.1

  else v_agua_100<-rbind(v_agua_100,v_agua_100.1)

  cont_100<-cont_100+1}

i<-i+1}
```

```
plot(v_agua_10[,2],v_agua_10[,1],type = "l",ylim=c(0,1),xlim=c(0,0.05),col="yellow",xlab="deltaT/(°C·m^2/W)",ylab="rend(-)")
```

```
abline(lm(v_agua_10[,1]~v_agua_10[,2]),col="yellow")
```

```
points(v_agua_30[,2],v_agua_30[,1],type = "l",col="green")
```

```
abline(lm(v_agua_30[,1]~v_agua_30[,2]),col="green")
```

```
points(v_agua_50[,2],v_agua_50[,1],type = "l",col="red")
```

```
abline(lm(v_agua_50[,1]~v_agua_50[,2]),col="red")
```

```
points(v_agua_70[,2],v_agua_70[,1],type = "l",col="blue")
```

```
abline(lm(v_agua_70[,1]~v_agua_70[,2]),col="blue")
```

```
points(v_agua_100[,2],v_agua_100[,1],type = "l",col="orange")
```

```
abline(lm(v_agua_100[,1]~v_agua_100[,2]),col="orange")
```

```
legend("topright",legend=c("v_agua=10 l/h","v_agua=30 l/h","v_agua=50 l/h","v_agua=70 l/h","v_agua=100 l/h"),fill=c("yellow","green","red","blue","orange"))
```

```
coeficientes.v_agua<-coef(lm(v_agua_10[,1]~v_agua_10[,2]))
```

```
coeficientes.v_agua<-rbind(coeficientes.v_agua,coef(lm(v_agua_30[,1]~v_agua_30[,2])))
```

```
coeficientes.v_agua<-rbind(coeficientes.v_agua,coef(lm(v_agua_50[,1]~v_agua_50[,2])))
```

```
coeficientes.v_agua<-rbind(coeficientes.v_agua,coef(lm(v_agua_70[,1]~v_agua_70[,2])))
```

```
coeficientes.v_agua<-rbind(coeficientes.v_agua,coef(lm(v_agua_100[,1]~v_agua_100[,2])))
```




```
row.names(coeficientes.v_agua)<-  
c("v_agua=10","v_agua=30","v_agua=50","v_agua=70","v_agua=100")
```

```
#CALCULOS ANCHO
```

```
load("ancho.ambiente.RData")
```

```
i<-1
```

```
b<-length(ancho.ambiente[,1])
```

```
cont_50<-1
```

```
cont_100<-1
```

```
cont_150<-1
```

```
cont_200<-1
```

```
cont_250<-1
```

```
cont_300<-1
```

```
while (i<b+1)
```

```
{"Ambiente"
```

```
  T_a<-ancho.ambiente[i,2]#Temperatura ambiente (?C)
```

```
  I<-ancho.ambiente[i,1]#Irradiancia (W/m2)
```

```
  "Placa absorcion"
```

```
  e_p<-3/1000#espesor de la placa de aluminio (m)
```

$k_p < -237$ #conductividad del aluminio de la placa (W/m°C)

$a < -$ ancho.ambiente[i,4] #anchura de la placa (m)

$A < -l * a$ #area del tramo(m²)

"Aislante"

$e_{ais} < -300/1000$ #espesor del material aislante (m)

$k_{ais} < -0.025$ #conductividad del poliuretano (W/m°C)

"Agua"

$v_{agua} < -30/(1000 * 3600)$ #caudal de agua (m³/s)

$m_{agua} < -v_{agua} * \rho_{agua}$ #caudal masico de agua (kg/s)

$T_{aguain} < -$ ancho.ambiente[i,3] #temperatura agua entrante a la placa (°C)

$T_{aguain1} < -$ ancho.ambiente[i,3]

$q_{aguatot} < -0$ #calor total contenido en el agua (W)

$T_{agua} < -T_{aguain}$ #Temperatura media del agua en el tramo

"Calculo del coeficiente de conveccion del agua"

$c_{agua} < -v_{agua}/(\pi * d_{in}^2/4)$ #velocidad del agua en la tuberia (m/s)

$Re_L < -\rho_{agua} * c_{agua} * l / \mu$ #numero de Reynolds

$Pr < -\mu * (c_e * 1000) / k_{agua}$ #Numero de Prandtl

$Nu < 0.023 \cdot Re_L^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$ Forma empírica número de Nusselt para convección forzada en régimen turbulento

$h_{\text{agua}} = \frac{Nu}{Re_L \cdot Pr} \cdot (\rho_{\text{agua}} \cdot c_e \cdot 1000) \cdot c_{\text{agua}}$ #coeficiente de convección del agua (W/m²·°C)

"RESISTIVIDADES TÈRMICAS"

$U_b = \frac{1}{\frac{e_p}{k_p} + \frac{e_{\text{ais}}}{k_{\text{ais}}} + \frac{1}{h_{\text{tras}}}}$

$U_t = \frac{h_{\text{ext}} + \sigma \cdot \epsilon \cdot ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4)}{T_p - T_a}$

$U_L = U_b + U_t$

$m = \sqrt{U_L / (k_p \cdot e_p)}$

$R_{\text{agua}} = \frac{1}{h_{\text{agua}} \cdot \pi \cdot r_{\text{in}}}$

$R_2 = \frac{e_p}{k_p} + \frac{e_{\text{ais}}}{k_{\text{ais}}} + \frac{1}{h_{\text{tras}}}$

$\text{function_R_4} = \text{function}(x) \quad \frac{1}{h_{\text{tras}} + (r_{\text{out}} + (e_{\text{ais}} - d_{\text{out}}) - (r_{\text{out}}^2 - x^2)^{0.5}) / (k_{\text{ais}} \cdot r_{\text{m}}^2) + \log(d_{\text{out}} / d_{\text{in}}) / ((\pi/2) \cdot k_t)}$

$\text{intR_4} = \text{integrate}(\text{function_R_4}, -r_{\text{out}}, r_{\text{out}})$

$R_4 = \text{intR_4}["\text{value}"]$

$R_{13} = \frac{e_p}{k_p \cdot d_{\text{out}}} + \frac{e_{\text{sol}}}{d_{\text{out}}} / (k_t \cdot d_{\text{out}}) + \log(d_{\text{out}} / d_{\text{in}}) / (k_t \cdot \pi)$

$$x <- (R_agua^2 * (R_4 + 1/h_agua)^2) / ((R_agua^2 * (R_4 + 1/h_agua)^2) - R_13^2 * (R_agua + (R_4 + 1/h_agua))^2)$$

$$y <- (R_13^2 * (R_agua + R_4)^2) / (-(R_agua^2 * R_4^2) + R_13^2 * (R_agua + R_4)^2)$$

$$"x * T_p - y * T_a"$$

$$Q <- \text{function}(T_p) \quad d_out * I * (I * \alpha - h_ext * (T_p - T_a) - \epsilon * \sigma * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4)) + (a - d_out) * I * (I * \alpha - (1 / (e_ais / k_ais + e_p / k_p + 1 / h_tras) + (h_ext + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a))) * (T_p - T_a)) * \tanh(\sqrt{(U_b + (h_ext + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a))) / (k_p * e_p)}) * (a - d_out) / 2) / (\sqrt{(U_b + (h_ext + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a))) / (k_p * e_p)}) * (a - d_out) / 2) - (h_agua * \pi * r_in * I * ((x * T_p + y * T_agua) - T_agua) + I * d_out * ((x * T_p + y * T_agua) - T_agua) / R_4 + \pi * r_m * I * h_agua * ((x * T_p + y * T_agua) - T_agua))$$

$$q_agua <- \text{function}(T_p) \quad h_agua * (\pi * r_in * I) * ((T_p * x + T_agua * y) - T_agua)^2$$

$$n <- 1$$

$$\text{while} (n < N + 1)$$

$$\{T_p <- \text{uniroot}(Q, \text{lower} = -12, \text{upper} = 45)\$root\} \#?C$$

$$q_aguanum <- q_agua(T_p) \#W$$

$$\Delta T <- ((q_aguanum) / 1000) / (c_e * m_agua) \#?C$$

$$T_aguaout <- T_aguain + \Delta T \#?C$$



```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2#?C
```

```
c<-T_p-5
```

```
d<-T_p+5
```

```
e<-1
```

```
while(e>10^-4)
```

```
{T_p1<-T_p#?C
```

```
T_p<-uniroot(Q,lower=c,upper=d)$root#?C
```

```
q_aguanum<-q_agua(T_p)#W
```

```
delta_T<-(q_aguanum/1000)/(c_e*m_agua)#?C
```

```
T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C
```

```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2
```

```
e<-Q(T_p)}
```

```
q_aguatot<-q_aguatot+q_aguanum
```

```
rend<-q_aguanum/(l*alpha*l*a)
```

```
T_aguain<-T_aguaout
```

```
n<-n+1}
```

```
mediarend<-q_aguatot/(alpha*l*L*a)
```

```
mediaTagua<-(T_aguain1+T_aguaout)/2
```

```
x<-(mediaTagua-T_a)/l
```

```
deltaT_ext<-mediaTagua-T_a
```

```
if (a==50/1000)
```

```
{a_50.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_50==1)
```

```
  a_50<-a_50.1
```

```
else a_50<-rbind(a_50,a_50.1)
```

```
cont_50<-cont_50+1}
```

```
if (a==100/(1000))
```

```
{a_100.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_100==1)
```

```
  a_100<-a_100.1
```



```
else a_100<-rbind(a_100,a_100.1)
```

```
cont_100<-cont_100+1}
```

```
if (a==150/(1000))
```

```
{a_150.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_150==1)
```

```
  a_150<-a_150.1
```

```
else a_150<-rbind(a_150,a_150.1)
```

```
cont_150<-cont_150+1}
```

```
if (a==200/(1000))
```

```
{a_200.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_200==1)
```

```
  a_200<-a_200.1
```

```
else a_200<-rbind(a_200,a_200.1)
```

```
cont_200<-cont_200+1}
```

```
if (a==250/(1000))
```

```
{a_250.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_250==1)
```

```
  a_250<-a_250.1
```

```
else a_250<-rbind(a_250,a_250.1)
```

```
cont_250<-cont_250+1}
```

```
if (a==300/(1000))

{a_300.1<-cbind(mediarend,x)

if (cont_300==1)

  a_300<-a_300.1

else a_300<-rbind(a_300,a_300.1)

cont_300<-cont_300+1}

i<-i+1}

plot(a_50[,2],a_50[,1],type = "l",ylim=c(0,1),xlim=c(0,0.05),col="yellow",xlab
="deltaT/l(°C·m^2/W)",ylab="rend(-)")

abline(lm(a_50[,1]~a_50[,2]),col="yellow")

points(a_100[,2],a_100[,1],type = "l",col="green")

abline(lm(a_100[,1]~a_100[,2]),col="green")

points(a_150[,2],a_150[,1],type = "l",col="red")

abline(lm(a_150[,1]~a_150[,2]),col="red")

points(a_200[,2],a_200[,1],type = "l",col="blue")

abline(lm(a_200[,1]~a_200[,2]),col="blue")

points(a_250[,2],a_250[,1],type = "l",col="purple")

abline(lm(a_250[,1]~a_250[,2]),col="purple")
```



```
points(a_300[,2],a_300[,1],type = "l",col="orange")
```

```
abline(lm(a_300[,1]~a_300[,2]),col="orange")
```

```
legend("topright",legend=c("a=50 mm","a=100 mm","a=150 mm","a=200 mm","a=250 mm","a=300 mm"),fill=c("yellow","green","red","blue","purple","orange"))
```

```
coeficientes.ancho<-coef(lm(a_50[,1]~a_50[,2]))
```

```
coeficientes.ancho<-rbind(coeficientes.ancho,coef(lm(a_100[,1]~a_100[,2])))
```

```
coeficientes.ancho<-rbind(coeficientes.ancho,coef(lm(a_150[,1]~a_150[,2])))
```

```
coeficientes.ancho<-rbind(coeficientes.ancho,coef(lm(a_200[,1]~a_200[,2])))
```

```
coeficientes.ancho<-rbind(coeficientes.ancho,coef(lm(a_250[,1]~a_250[,2])))
```

```
coeficientes.ancho<-rbind(coeficientes.ancho,coef(lm(a_300[,1]~a_300[,2])))
```

```
row.names(coeficientes.ancho)<-c("a=50","a=100","a=150","a=200","a=250","a=300")
```

```
#Variación revestimiento
```

```
load("revestimiento.ambiente.RData")
```

```
i<-1
```

```
b<-length(revestimiento.ambiente[,1])
```

```
cont_ac_0.5<-1
```

```
cont_al_1<-1
```

cont_al_2<-1

cont_al_3<-1

while (i<b+1)

{"Ambiente"

T_a<-revestimiento.ambiente[i,2]#Temperatura ambiente (?C)

I<-revestimiento.ambiente[i,1]#Irradiancia (W/m2)

"Placa absorcion"

e_p<-revestimiento.ambiente[i,5]#espesor de la placa de aluminio (m)

k_p<-revestimiento.ambiente[i,4]#conductividad del aluminio de la placa (W/m?C)

epsilon<-revestimiento.ambiente[i,6]

a<-100*10^-3#anchura de la placa (m)

A<-I*a#area del tramo(m2)

"Aislante"

e_ais<-300/1000#espesor del material aislante (m)

k_ais<-0.025#conductividad del poliuretano (W/m?C)

"Agua"

v_agua<-30/(1000*3600)#caudal de agua (m3/s)

m_agua<-v_agua*rho_agua#caudal masico de agua (kg/s)

T_aguain<-revestimiento.ambiente[i,3]#temperaturaagua entrante a la placa (?C)

T_aguain1<-revestimiento.ambiente[i,3]

q_aguatot<-0 #calor total contenido en el agua (W)

$T_{\text{agua}} <- T_{\text{aguain}}$ # Temperatura media del agua en el tramo

"Calculo del coeficiente de conveccion del agua"

$c_{\text{agua}} <- v_{\text{agua}} / (\pi * d_{\text{in}}^2 / 4)$ # velocidad del agua en la tuberia (m/s)

$Re_L <- \rho_{\text{agua}} * c_{\text{agua}} * l / \mu$ # numero de Reynolds

$Pr <- \mu * (c_e * 1000) / k_{\text{agua}}$ # Numero de Prandtl

$Nu <- 0.023 * Re_L^{0.8} * Pr^{0.4}$ # Forma empirica numero de Nusselt para conveccion forzada en regimen turbulento

$h_{\text{agua}} <- (Nu / (Re_L * Pr)) * (\rho_{\text{agua}} * (c_e * 1000) * c_{\text{agua}})$ # coeficiente de conveccion del agua (W/m²*C)

"RESISTIVIDADES TÈRMICAS"

$U_b <- 1 / (e_p / k_p + e_{\text{ais}} / k_{\text{ais}} + 1 / h_{\text{tras}})$

$U_t <- h_{\text{ext}} + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a)$

$U_L <- U_b + U_t$

$m <- \sqrt{U_L / (k_p * e_p)}$ "

$R_{\text{agua}} <- 1 / (h_{\text{agua}} * \pi * r_{\text{in}})$

function_R_4 <- function(x) 1/h_tras + (r_out + (e_ais - d_out) - (r_out^2 - x^2)^0.5) / (k_ais * r_m^2) + log(d_out/d_in) / ((pi/2) * k_t)

intR_4 <- integrate(function_R_4, -r_out, r_out)

```
R_4<-intR_4[["value"]]
```

```
R_13<-e_p/(k_p*d_out)+(e_sol/d_out)/(k_t*d_out)+log(d_out/d_in)/(k_t*pi)
```

```
x<-(R_agua^2*(R_4+1/h_agua)^2)/((R_agua^2*(R_4+1/h_agua)^2)-  
R_13^2*(R_agua+(R_4+1/h_agua))^2)
```

```
y<-(R_13^2*(R_agua+R_4)^2)/(-(R_agua^2*R_4^2)+R_13^2*(R_agua+R_4)^2)
```

```
"x*T_p-y*T_a"
```

```
Q<-function(T_p)d_out*I*(I*alpha-h_ext*(T_p-T_a)-epsilon*sigma*((T_p+273)^4-  
(T_a+273)^4))+(a-d_out)*I*(I*alpha-  
(1/(e_ais/k_ais+e_p/k_p+1/h_tras)+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4)/(T_p-  
T_a)))*(T_p-T_a))*tanh(sqrt((U_b+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4)/(T_p-  
T_a)))/(k_p*e_p))*(a-d_out)/2)/(sqrt((U_b+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4)/(T_p-  
T_a)))/(k_p*e_p))*(a-d_out)/2)-(h_agua*pi*r_in*I*((x*T_p+y*T_agua)-  
T_agua)+I*d_out*((x*T_p+y*T_agua)-T_agua)/R_4+pi*r_m*I*h_agua*((x*T_p+y*T_agua)-T_agua))
```

```
q_agua<-function(T_p) h_agua*(pi*r_in*I)*((T_p*x+T_agua*y)-T_agua)^2
```

```
n<-1
```

```
while (n<N+1)
```

```
{T_p<-uniroot(Q,lower=-12,upper=45)$root#?C
```

```
q_aguanum<-q_agua(T_p)#W
```

```
delta_T<-((q_aguanum)/1000)/(c_e*m_agua)#?C
```

```
T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C
```

```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2#?C
```



```
c<-T_p-5
```

```
d<-T_p+5
```

```
e<-1
```

```
while(e>10^-4)
```

```
{T_p1<-T_p#?C
```

```
T_p<-uniroot(Q,lower=c,upper=d)$root#?C
```

```
q_aguanum<-q_agua(T_p)#W
```

```
delta_T<-(q_aguanum/1000)/(c_e*m_agua)#?C
```

```
T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C
```

```
T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2
```

```
e<-Q(T_p)}
```

```
q_aguatot<-q_aguatot+q_aguanum
```

```
rend<-q_aguanum/(l*alpha*I*a)
```

```
T_aguain<-T_aguaout
```

```
n<-n+1}
```

```
mediarend<-q_aguatot/(alpha*I*L*a)
```

```
mediaTagua<-(T_aguain1+T_aguaout)/2
```

```
x<-(mediaTagua-T_a)/l
deltaT_ext<-mediaTagua-T_a

if (R_3==(1/1000)/(237*A))
{al_1.1<-cbind(mediarend,x)
if (cont_al_1==1)
  al_1<-al_1.1
else al_1<-rbind(al_1,al_1.1)
cont_al_1<-cont_al_1+1}

if (R_3==(2/1000)/(237*A))
{al_2.1<-cbind(mediarend,x)
if (cont_al_2==1)
  al_2<-al_2.1
else al_2<-rbind(al_2,al_2.1)
cont_al_2<-cont_al_2+1}

if (R_3==(3/1000)/(237*A))
{al_3.1<-cbind(mediarend,x)
if (cont_al_3==1)
  al_3<-al_3.1
else al_3<-rbind(al_3,al_3.1)
cont_al_3<-cont_al_3+1}
```

```

if (R_3==(0.5/1000)/(50*A))

{ac_0.5.1<-cbind(mediarend,x)

if (cont_ac_0.5==1)

  ac_0.5<-ac_0.5.1

else ac_0.5<-rbind(ac_0.5,ac_0.5.1)

cont_ac_0.5<-cont_ac_0.5+1}

i<-i+1}

plot(al_1[,2],al_1[,1],ylim=c(0,1),type="l",xlim=c(0,0.05),col="yellow",xlab
="deltaT/l(°C·m^2/W)",ylab="rend(-)")

abline(lm(al_1[,1]~al_1[,2]),col="yellow")

points(al_2[,2],al_2[,1],type = "l",col="green")

abline(lm(al_2[,1]~al_2[,2]),col="green")

points(al_3[,2],al_3[,1],type = "l",col="red")

abline(lm(al_3[,1]~al_3[,2]),col="red")

points(ac_0.5[,2],ac_0.5[,1],type = "n",col="blue")

abline(lm(ac_0.5[,1]~ac_0.5[,2]),col="blue")

legend("topright",legend=c("Aluminio 1mm", "Aluminio 2mm", "Aluminio 3mm", "Acero
0.5mm"),fill=c("yellow", "green", "red", "blue"))

coeficientes.revestimiento<-coef(lm(al_1[,1]~al_1[,2]))
  
```

```
coeficientes.revestimiento<-rbind(coeficientes.revestimiento,coef(lm(al_2[,1]~al_2[,2])))
coeficientes.revestimiento<-rbind(coeficientes.revestimiento,coef(lm(al_3[,1]~al_3[,2])))
coeficientes.revestimiento<-rbind(coeficientes.revestimiento,coef(lm(ac_0.5[,1]~ac_0.5[,2])))

row.names(coeficientes.revestimiento)<-c("aluminio 1mm","aluminio 2mm","aluminio 3mm","acero
0.5mm")

#Variando aislante

load("aislante.ambiente.RData")

i<-1

b<-length(aislante.ambiente[,1])

cont_0<-1

cont_2<-1

cont_4<-1

cont_6<-1

cont_8<-1

cont_10<-1

while (i<b+1)

{"Ambiente"

  T_a<-aislante.ambiente[i,2]#Temperatura ambiente (?C)

  I<-aislante.ambiente[i,1]#Irradiancia (W/m2)
```


"Placa absorcion"

$e_p <- 3/1000$ #espesor de la placa de aluminio (m)

$k_p <- 237$ #conductividad del aluminio de la placa (W/m°C)

$\epsilon <- 0.07$

$a <- 100 * 10^{-3}$ #anchura de la placa (m)

$A <- l * a$ #area del tramo(m²)

"Aislante"

$e_{ais} <- \text{aislante.ambiente}[i,5]$ #espesor del material aislante (m)

$k_{ais} <- \text{aislante.ambiente}[i,4]$ #conductividad del poliuretano (W/m°C)

"Tuberia"

$d_{in} <- 8 * 10^{-3}$ #diámetro interior de la tuberia (m)

$r_{in} <- d_{in}/2$

$d_{out} <- 10 * 10^{-3}$ #diámetro exterior de la tubería (m)

$k_t <- 401$ #conductividad del cobre de la tubería (W/m°C)

$r_{out} <- d_{out}/2$

$\text{function_sol} <- \text{function}(x) r_{out} - \sqrt{r_{out}^2 - x^2}$

$\text{intd_sol} <- \text{integrate}(\text{function_sol}, r_{out}, r_{out})$

$e_{sol} <- \text{intd_sol}[["value"]]$

$r_m <- (r_{in} + r_{out})/2$

"Agua"

$v_{\text{agua}} < -30 / (1000 * 3600) \# \text{caudal de agua (m}^3/\text{s)}$

$m_{\text{agua}} < -v_{\text{agua}} * \rho_{\text{agua}} \# \text{caudal masico de agua (kg/s)}$

$T_{\text{aguain}} < \text{aislante.ambiente}[i,3] \# \text{temperatura agua entrante a la placa (?C)}$

$T_{\text{aguain1}} < \text{aislante.ambiente}[i,3]$

$q_{\text{aguatot}} < -0 \# \text{calor total contenido en el agua (W)}$

$T_{\text{agua}} < -T_{\text{aguain}} \# \text{Temperatura media del agua en el tramo}$

"Calculo del coeficiente de conveccion del agua"

$c_{\text{agua}} < -v_{\text{agua}} / (\pi * d_{\text{in}}^2 / 4) \# \text{velocidad del agua en la tuberia (m/s)}$

$Re_L < \rho_{\text{agua}} * c_{\text{agua}} * l / \mu \# \text{numero de Reynolds}$

$Pr < \mu * (c_e * 1000) / k_{\text{agua}} \# \text{Numero de Prandtl}$

$Nu < 0.023 * Re_L^{0.8} * Pr^{0.4} \# \text{Forma empirica numero de Nusselt para conveccion forzada en regimen turbulento}$

$h_{\text{agua}} < (Nu / (Re_L * Pr)) * (\rho_{\text{agua}} * (c_e * 1000) * c_{\text{agua}}) \# \text{coeficiente de conveccion del agua (W/m}^2\text{?C)}$

"RESISTIVIDADES T?RMICAS"

$U_b < 1 / (e_p / k_p + e_{\text{ais}} / k_{\text{ais}} + 1 / h_{\text{tras}})$

$U_t < -h_{\text{ext}} + \sigma * \epsilon * ((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4) / (T_p - T_a)$

$U_L < -U_b + U_t$

```
m<-sqrt(U_L/(k_p*e_p))"
```

```
R_agua<-1/(h_agua*pi*r_in)
```

```
function_R_4<-function(x)1/h_tras+(r_out+(e_ais-d_out)-(r_out^2-x^2)^0.5)/(k_ais*r_m^2)+log(d_out/d_in)/((pi/2)*k_t)
```

```
intR_4<-integrate(function_R_4,-r_out,r_out
```

```
R_4<-intR_4[["value"]]
```

```
R_13<-e_p/(k_p*d_out)+(e_sol/d_out)/(k_t*d_out)+log(d_out/d_in)/(k_t*pi)
```

```
x<-(R_agua^2*(R_4+1/h_agua)^2)/((R_agua^2*(R_4+1/h_agua)^2)-R_13^2*(R_agua+(R_4+1/h_agua))^2)
```

```
y<-(R_13^2*(R_agua+R_4)^2)/(-(R_agua^2*R_4^2)+R_13^2*(R_agua+R_4)^2)
```

```
"x*T_p-y*T_a"
```

```

Q<-function(T_p)
  d_out*I*(I*alpha-h_ext*(T_p-T_a)-epsilon*sigma*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4))+
  (a-d_out)*I*(I*alpha-
  (1/(e_ais/k_ais+e_p/k_p+1/h_tras)+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4)/(T_p-T_a))
  *(T_p-T_a))*tanh(sqrt((U_b+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4)/(T_p-T_a)))/
  (k_p*e_p))*(a-d_out)/2)/(sqrt((U_b+(h_ext+sigma*epsilon*((T_p+273)^4-(T_a+273)^4)/(T_p-T_a)))/
  (k_p*e_p))*(a-d_out)/2)-(h_agua*pi*r_in*I*((x*T_p+y*T_agua)-T_agua)+I*d_out*
  ((x*T_p+y*T_agua)-T_agua)/R_4+pi*r_m*I*h_agua*((x*T_p+y*T_agua)-T_agua))

```

```
q_agua<-function(T_p) h_agua*(pi*r_in*I)*((T_p*x+T_agua*y)-T_agua)*2
```

n<-1

while (n<N+1)

{T_p<-uniroot(Q,c(-12,45),extendInt = "yes")\$root#?C

q_aguanum<-q_agua(T_p)#W

delta_T<-((q_aguanum)/1000)/(c_e*m_agua)#?C

T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C

T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2#?C

c<-T_p-5

d<-T_p+5

e<-1

while(e>10^-4)

{T_p1<-T_p#?C

T_p<-uniroot(Q,lower=c,upper=d)\$root#?C

q_aguanum<-q_agua(T_p)#W

delta_T<-(q_aguanum/1000)/(c_e*m_agua)#?C

T_aguaout<-T_aguain+delta_T#?C

T_agua<-(T_aguain+T_aguaout)/2

e<-Q(T_p)}

q_aguatot<-q_aguatot+q_aguanum



```
rend<-q_aguanum/(l*alpha*l*a)
```

```
T_aguain<-T_aguaout
```

```
n<-n+1}
```

```
mediarend<-q_aguatot/(alpha*l*L*a)
```

```
mediaTagua<-(T_aguain1+T_aguaout)/2
```

```
x<-(mediaTagua-T_a)/l
```

```
deltaT_ext<-mediaTagua-T_a
```

```
R_ais<-e_ais/k_ais
```

```
if (R_ais==0)
```

```
{Rais_0.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_0==1)
```

```
    Rais_0<-Rais_0.1
```

```
else Rais_0<-rbind(Rais_0,Rais_0.1)
```

```
cont_0<-cont_0+1}
```

```
if (R_ais==2)
```

```
{Rais_2.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_2==1)
```

```
    Rais_2<-Rais_2.1
```

```
else Rais_2<-rbind(Rais_2,Rais_2.1)
```

```
cont_2<-cont_2+1}
```

```
if (R_ais==4)
```

```
{Rais_4.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_4==1)
```

```
  Rais_4<-Rais_4.1
```

```
else Rais_4<-rbind(Rais_4,Rais_4.1)
```

```
cont_4<-cont_4+1}
```

```
if (R_ais==6)
```

```
{Rais_6.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_6==1)
```

```
  Rais_6<-Rais_6.1
```

```
else Rais_6<-rbind(Rais_6,Rais_6.1)
```

```
cont_6<-cont_6+1}
```

```
if (R_ais==8)
```

```
{Rais_8.1<-cbind(mediarend,x)
```

```
if (cont_8==1)
```

```
  Rais_8<-Rais_8.1
```

```
else Rais_8<-rbind(Rais_8,Rais_8.1)
```

```
cont_8<-cont_8+1}
```

```
if (R_ais==10)
```

```
{Rais_10.1<-cbind(mediarend,x)
```



```
if (cont_10==1)

  Rais_10<-Rais_10.1

else Rais_10<-rbind(Rais_10,Rais_10.1)

cont_10<-cont_10+1}

i<-i+1}

plot(Rais_0[,2],Rais_0[,1],type="l",ylim=c(0,1),xlim=c(0,0.05),col="yellow",xlab
="deltaT/l(°C·m^2/W)",ylab="rend(-)")

abline(lm(Rais_0[,1]~Rais_0[,2]),col="yellow")

points(Rais_2[,2],Rais_2[,1],type = "l",col="green")

abline(lm(Rais_2[,1]~Rais_2[,2]),col="green")

points(Rais_4[,2],Rais_4[,1],type = "l",col="red")

abline(lm(Rais_4[,1]~Rais_4[,2]),col="red")

points(Rais_6[,2],Rais_6[,1],type = "l",col="blue")

abline(lm(Rais_6[,1]~Rais_6[,2]),col="blue")

points(Rais_8[,2],Rais_8[,1],type = "l",col="orange")

abline(lm(Rais_8[,1]~Rais_8[,2]),col="orange")

points(Rais_10[,2],Rais_10[,1],type = "l",col="purple")
```

```
abline(lm(Rais_10[,1]~Rais_10[,2]),col="purple")
```

```
legend("topright",legend=c("Rais=0","Rais=2","Rais=4","Rais=6","Rais=8","Rais=10"),fill=c("yellow","green","red","blue","orange","purple"))
```

```
coeficientes.aislante<-coef(lm(Rais_0[,1]~Rais_0[,2]))
```

```
coeficientes.aislante<-rbind(coeficientes.aislante,coef(lm(Rais_2[,1]~Rais_2[,2])))
```

```
coeficientes.aislante<-rbind(coeficientes.aislante,coef(lm(Rais_4[,1]~Rais_4[,2])))
```

```
coeficientes.aislante<-rbind(coeficientes.aislante,coef(lm(Rais_6[,1]~Rais_6[,2])))
```

```
coeficientes.aislante<-rbind(coeficientes.aislante,coef(lm(Rais_8[,1]~Rais_8[,2])))
```

```
coeficientes.aislante<-rbind(coeficientes.aislante,coef(lm(Rais_10[,1]~Rais_10[,2])))
```

```
row.names(coeficientes.aislante)<-c("sin  
aislante","e_ais/k_ais=2","e_ais/k_ais=4","e_ais/k_ais=6","e_ais/k_ais=8","e_ais/k_ais=10")
```