



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería mecánica**

**ANÁLISIS DE MEDIDAS DE AHORRO  
ENERGÉTICO (MAES), APLICABLES A UN  
EDIFICIO UNIVERSITARIO DE BAJO  
CONSUMO ENERGÉTICO.**

**Autor:**

**Martín-Sanz García, José Ramón**

**Tutor:**

**Velasco Gómez, Eloy  
Dpto. Ingeniería Energética y  
Fluidomecánica/Máquinas y  
Motores Térmicos**

**Valladolid, marzo 2017.**

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

---

## RESUMEN

---

El TFG aborda el estudio de la doble piel del Edificio Lucía, referente en sostenibilidad, buscando fomentar el ahorro mediante Medidas de Ahorro Energético (MAEs). En este sentido, se propone la circulación de aire a través de la doble piel para calentar aire y utilizarlo para calefactar el edificio.

En el estudio se abordan desde la concepción de un modelo hasta la evaluación de los ahorros energéticos, pasando por la medida de datos experimentales así como la validación de datos teóricos comparándolos con resultados empíricos.

Las conclusiones son que si bien existen ahorros energéticos, su cantidad es tan pequeña que no merecería la pena invertir en equipos para cantidades tan bajas. La medida propuesta solo podría ser utilizada en caso de que se combinara con otras MAEs.

---

## PALABRAS CLAVE

---

Energía, paneles fotovoltaicos, fachada ventilada, sostenibilidad, ventilación.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

## ABSTRACT

---

The TFG addresses the study of the ventilated façade of the Edificio Lucía, a worldwide reference in sustainability. It seeks to promote savings through Energy Saving Measures (ECMs). In this sense, the solution proposed is the circulation of air through the double skin to heat the air and use it to heat the building.

The study deals with the conception of a model, the evaluation of energy savings, and the measurement of experimental data as well as the validation of theoretical data, comparing it with empirical results.

The conclusions are that even there are energy savings, their amount is so small that it is not worth investing in equipment for such low amounts. The proposed measure could only be implemented if it was combined with other ECM.

---

## KEY WORDS

---

Energy, photovoltaic panels, ventilated facade, sustainability, ventilation.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

---

# ÍNDICE

---

RESUMEN .....	3
PALABRAS CLAVE.....	3
ABSTRACT .....	5
KEY WORDS .....	5
ÍNDICE.....	7
OBJETIVOS .....	13
CONTENIDOS .....	15
ACLARACIÓN SOBRE FIGURAS, TABLAS, ECUACIONES BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS. ....	20
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	25
1. SITUACIÓN ENERGÉTICA.....	27
1.1. SITUACIÓN ENERGÉTICA A NIVEL MUNDIAL.....	27
ACUERDO DE PARÍS .....	29
COMPROMISOS Y OBJETIVOS CLIMÁTICOS .....	29
LA EFICIENCIA ES EL MOTOR DEL CAMBIO .....	30
UNA NUEVA ASIGNACIÓN DEL CAPITAL .....	31
LA POLÍTICA SE CENTRA EN LA INTEGRACIÓN .....	31
LA SENDA HACIA LOS 2 °C ES TORTUOSA: EL CAMINO HACIA 1,5 °C ATRAVIESA UN TERRITORIO INEXPLORADO .....	31
LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y LOS RIESGOS DE LA TRANSICIÓN A BAJAS EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	31
LAS RENOVABLES SE LIBERAN .....	32
LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DEL MUNDO SIGUEN CRECIENDO, PERO MUCHOS MILLONES DE PERSONAS ESTÁN QUEDÁNDOSE AL MARGEN .....	33
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS LISTOS PARA AVANZAR .....	34
ENERGÍA Y AGUA: UNA NO FLUYE SIN LA OTRA.....	35
1.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA A NIVEL NACIONAL.....	35

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

EVOLUCIÓN DEL CONSUMO EN ESPAÑA .....	36
EVOLUCIÓN SECTORIAL DE LA DEMANDA .....	37
EVOLUCIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES .....	38
CONCLUSIONES DE LA SITUACIÓN ENERGÉTICA EN ESPAÑA.....	40
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO LUCÍA .....</b>	<b>42</b>
<b>2.1. LOCALIZACIÓN .....</b>	<b>42</b>
<b>2.2. EL EDIFICIO.....</b>	<b>43</b>
<b>2.3. ESTRATEGIAS .....</b>	<b>44</b>
DISEÑO BIOCLIMÁTICO.....	45
ENERGÍA NULA: COGENERACIÓN.....	49
ENERGÍA PRIMARIA: BIOMASA .....	50
INTEGRACIÓN OTRAS ENERGÍAS RENOVABLES: FOTOVOLTAICA Y GEOTÉRMICA .....	52
ORIENTACIÓN E ILUMINACIÓN.....	54
RECUPERACIÓN DE AGUA.....	57
GESTIÓN DE RESIDUOS .....	58
<b>2.4. PREMIOS Y CERTIFICACIONES .....</b>	<b>61</b>
PREMIOS .....	61
CERTIFICACIONES.....	62
<b>3. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>65</b>
DESARROLLO HISTÓRICO.....	65
ÚLTIMOS AVANCES .....	70
<b>3.2. ESTADO DEL ARTE DE LAS FACHADAS VENTILADAS .....</b>	<b>72</b>
DEFINICIÓN.....	72
FUNCIONAMIENTO .....	72
ÚLTIMOS AVANCES .....	72
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>74</b>
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....	74
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB .....	75
<b>TABLAS.....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURAS.....</b>	<b>78</b>
<b>CAPÍTULO II: ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LA DOBLE PIEL .....</b>	<b>81</b>

<b>1. OBJETIVOS DE LA MEDIDA.....</b>	<b>83</b>
<b>2. EQUIPOS DE MEDIDA.....</b>	<b>84</b>
<b>2.1. SONDAS DE TEMPERATURA.....</b>	<b>84</b>
TESTO 175 H1 - DATALOGGER DE TEMPERATURA Y HUMEDAD .....	84
TESTO 175 T2 - DATALOGGER DE TEMPERATURA DE DOS CANALES .....	85
<b>2.2. TESTO COMSOFT BÁSICO.....</b>	<b>86</b>
<b>2.3. PIRANÓMETRO .....</b>	<b>87</b>
<b>2.4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL PIRANÓMETRO .....</b>	<b>88</b>
<b>2.5. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL EDIFICIO LUCÍA .....</b>	<b>89</b>
SENSOR DE T/H DEL AIRE .....	91
PIRANÓMETRO .....	91
<b>2.6. TERMOCÁMARA .....</b>	<b>92</b>
<b>2.7. MEDIDOR DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL.....</b>	<b>93</b>
MEDIDOR MULTIFUNCIÓN .....	93
<b>2.8. CÁMARA TÉRMICA .....</b>	<b>95</b>
<b>2.9. HORNO DE CALIBRACIÓN .....</b>	<b>96</b>
<b>3. CALIBRACIÓN DE SONDAS.....</b>	<b>98</b>
<b>3.1. CALIBRACIÓN EN HORNO .....</b>	<b>98</b>
<b>3.2. CALIBRACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE .....</b>	<b>101</b>
<b>3.3. CALIBRACIÓN A ALTA TEMPERATURA.....</b>	<b>103</b>
<b>3.4. CALIBRACIÓN A BAJA TEMPERATURA.....</b>	<b>106</b>
<b>3.5. CURVAS DE CORRECCIÓN.....</b>	<b>113</b>
CÁLCULO DEL PUNTO DE CORTE .....	113
ECUACIÓN DE TEMPERATURA REAL .....	114
<b>4. DESARROLLO DE EXPERIMENTOS EN EL EDIFICIO LUCÍA .....</b>	<b>116</b>
<b>4.1. MEDIDAS DE TEMPERATURA.....</b>	<b>116</b>
OBJETIVO DE LAS MEDIDAS .....	116
DISPOSICIÓN DE LAS SONDAS.....	117
TOMA DE DATOS .....	118
ANÁLISIS DE LOS DATOS .....	119
<b>4.2. MEDIDAS DE RADIACIÓN.....</b>	<b>126</b>
RADIACIÓN EXTERIOR .....	126
CÁLCULO DE LA TRANSMITIVIDAD .....	127
MEDIDAS REALIZADAS .....	128
CÁLCULO DE LA TRANSMITIVIDAD .....	131
<b>MEDIDAS DE ABSORTIVIDAD.....</b>	<b>137</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>140</b>
<b>FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>140</b>
<b>REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB .....</b>	<b>140</b>
<b>TABLAS.....</b>	<b>142</b>
<b>FIGURAS.....</b>	<b>143</b>
<b>CAPÍTULO III: MODELO MATEMÁTICO Y DE COMPORTAMIENTO .....</b>	<b>145</b>
<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.....</b>	<b>147</b>
<b>1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS DE TRANSFERENCIA .....</b>	<b>147</b>
<b>1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR .....</b>	<b>148</b>
TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN: .....	149
TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.....	154
TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN .....	167
<b>1.3. ECUACIONES UTILIZADAS .....</b>	<b>169</b>
CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES GLOBALES .....	169
<b>1.4. RADIACIÓN INCIDENTE .....</b>	<b>171</b>
PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS DE INSTALACIONES DE BAJA TEMPERATURA.....	173
CORRECCIÓN POR AZIMUT Y LA INCLINACIÓN DE LOS PANELES.....	174
<b>2. ECUACIONES Y BALANCES EN LA DOBLE PIEL.....</b>	<b>176</b>
<b>2.1. DIVISIÓN DE LA DOBLE PIEL.....</b>	<b>176</b>
<b>2.2. RADIACIÓN INCIDENTE .....</b>	<b>181</b>
CÁLCULO DE $K_{Sol,i}$ .....	182
<b>2.3. BALANCES DE ENERGÍA .....</b>	<b>185</b>
BALANCE DE LA CÁMARA CON EL EXTERIOR .....	185
BALANCE A LA CÁMARA .....	192
<b>3. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>197</b>
<b>3.1. HIPÓTESIS DE TEMPERATURA .....</b>	<b>197</b>
<b>3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>199</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>201</b>
<b>FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>201</b>

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB .....	201
TABLAS.....	202
FIGURAS.....	203
<b>CAPÍTULO IV: MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO .....</b>	<b>205</b>
<b>1. PROPUESTA DE MEJORA .....</b>	<b>207</b>
<b>1.1. FUNCIONAMIENTO ACTUAL .....</b>	<b>207</b>
<b>1.2. MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO (MAES) .....</b>	<b>211</b>
MEJORAS EN INVIERNO.....	211
MEJORAS EN VERANO.....	214
<b>1.3. RECIRCULACIÓN INTERNA EN INVIERNO .....</b>	<b>217</b>
<b>2. EVALUACIÓN DE AHORROS EN CALEFACCIÓN .....</b>	<b>218</b>
<b>2.1. VERIFICACIÓN DE MODO DE FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>218</b>
<b>2.2. MODELO CON RECIRCULACIÓN.....</b>	<b>219</b>
<b>2.3. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE VENTILACIÓN .....</b>	<b>224</b>
<b>2.4. EVALUACIÓN DE AHORROS DE CALEFACCIÓN .....</b>	<b>229</b>
<b>2.5. COP DE LA INSTALACIÓN .....</b>	<b>231</b>
<b>3. EVALUACIÓN DE MEJORA DEL RENDIMIENTO DEL FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>232</b>
<b>3.1. PÉRDIDA DE RENDIMIENTO CON LA TEMPERATURA.....</b>	<b>232</b>
<b>3.2. MEJORA DEL RENDIMIENTO .....</b>	<b>233</b>
<b>3.3. MEJORA EN EL COP DE INSTALACIÓN .....</b>	<b>234</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>236</b>
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	236
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB .....	236
TABLAS.....	237
FIGURAS.....	238
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....</b>	<b>239</b>

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

<b>1. CONCLUSIONES .....</b>	<b>241</b>
<b>2. FUTUROS DESARROLLOS .....</b>	<b>243</b>
<b>2.1. MEJORA DEL ESTUDIO ACTUAL .....</b>	<b>243</b>
NUEVOS ASPECTOS A ABARCAR .....	243
MEJORA DEL MODELO.....	243
OTRAS VARIABLES DE OPTIMIZACIÓN .....	244
<b>2.2. OTRAS MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO (MAES) .....</b>	<b>245</b>
<b>TABLAS.....</b>	<b>250</b>
<b>FIGURAS.....</b>	<b>251</b>

---

## OBJETIVOS

---

El presente proyecto tiene tres objetivos:

1. Analizar el comportamiento de la doble piel del Edificio Lucía.
2. Realizar un modelo matemático que describa el comportamiento del Edificio Lucía. Esto se realizará mediante el desarrollo de ecuaciones teóricas y estudios experimentales.
3. Proponer Medidas de Ahorro Energético (MAEs) y evaluar su impacto mediante el modelo realizado.

A través de estos puntos se pretende ofrecer una visión más amplia del comportamiento de las fachadas ventiladas del Edificio Lucía y evaluar los efectos de diferentes mejoras energéticas.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

---

# CONTENIDOS

---

En el presente TFG se desarrollarán cinco capítulos con los siguientes apartados:

## Capítulo 1: Introducción

### 1. SITUACIÓN ENERGÉTICA

- 1.1. SITUACIÓN ENERGÉTICA A NIVEL MUNDIAL
- 1.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA A NIVEL NACIONAL.

### 2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO LUCÍA

- 2.1. LOCALIZACIÓN
- 2.2. EL EDIFICIO
- 2.3. ESTRATEGIAS
- 2.4. PREMIOS Y CERTIFICACIONES

### 3. ESTADO DEL ARTE

- 3.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS
- 3.2. ESTADO DEL ARTE DE LAS FACHADAS VENTILADAS

## BIBLIOGRAFÍA

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS  
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB

## TABLAS

## FIGURAS

## **Capítulo 2: Estudio experimental en la doble piel**

### **1. OBJETIVOS DE LA MEDIDA**

### **2. EQUIPOS DE MEDIDA**

- 2.1. SONDAS DE TEMPERATURA
- 2.2. TESTO COMSOFT BÁSICO
- 2.3. PIRANÓMETRO
- 2.4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL PIRANÓMETRO
- 2.5. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL EDIFICIO LUCÍA
- 2.6. TERMOCÁMARA
- 2.7. MEDIDOR DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL
- 2.8. CÁMARA TÉRMICA
- 2.9. HORNO DE CALIBRACIÓN

### **3. CALIBRACIÓN DE SONDAS**

- 3.1. CALIBRACIÓN EN HORNO
- 3.2. CALIBRACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE
- 3.3. CALIBRACIÓN A ALTA TEMPERATURA
- 3.4. CALIBRACIÓN A BAJA TEMPERATURA
- 3.5. CURVAS DE CORRECCIÓN

### **4. DESARROLLO DE EXPERIMENTOS EN EL EDIFICIO LUCÍA**

- 4.1. MEDIDAS DE TEMPERATURA
- 4.2. MEDIDAS DE RADIACIÓN
- MEDIDAS DE ABSORTIVIDAD

### **BIBLIOGRAFÍA**

- FUENTES BIBLIOGRÁFICAS
- REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB

### **TABLAS**

### **FIGURAS**

## **Capítulo 3: Modelo matemático de comportamiento**

### **1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR**

- 1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS DE TRANSFERENCIA
- 1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR
- 1.3. ECUACIONES UTILIZADAS
- 1.4. RADIACIÓN INCIDENTE

### **2. ECUACIONES Y BALANCES EN LA DOBLE PIEL**

- 2.1. DIVISIÓN DE LA DOBLE PIEL
- 2.2. RADIACIÓN INCIDENTE
- 2.3. BALANCES DE ENERGÍA

### **3. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES**

- 3.1. HIPÓTESIS DE TEMPERATURA
- 3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO 199

### **BIBLIOGRAFÍA**

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS  
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB

### **TABLAS**

### **FIGURAS**

## **Capítulo 4: Medidas de ahorro energético**

### **1. PROPUESTA DE MEJORA**

- 1.1. FUNCIONAMIENTO ACTUAL
- 1.2. MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO (MAES)
- 1.3. RECIRCULACIÓN INTERNA EN INVIERNO

### **2. EVALUACIÓN DE AHORROS EN CALEFACCIÓN**

- 2.1. VERIFICACIÓN DE MODO DE FUNCIONAMIENTO
- 2.2. MODELO CON RECIRCULACIÓN
- 2.3. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE VENTILACIÓN 224
- 2.4. EVALUACIÓN DE AHORROS DE CALEFACCIÓN
- 2.5. COP DE LA INSTALACIÓN 231

### **3. EVALUACIÓN DE MEJORA DEL RENDIMIENTO DEL FOTOVOLTAICO**

- 3.1. PÉRDIDA DE RENDIMIENTO CON LA TEMPERATURA
- 3.2. MEJORA DEL RENDIMIENTO
- 3.3. MEJORA EN EL COP DE INSTALACIÓN

### **BIBLIOGRAFÍA**

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS  
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB

### **TABLAS**

### **FIGURAS**

## **Capítulo 5: Conclusiones y futuros desarrollos**

### **1. CONCLUSIONES**

### **2. FUTUROS DESARROLLOS**

#### **2.1. MEJORA DEL ESTUDIO ACTUAL**

#### **2.2. OTRAS MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO (MAES)**

### **TABLAS**

### **FIGURAS**

## **Aclaración sobre figuras, tablas, ecuaciones bibliografía y anexos.**

---

Se quiere aclarar en este apartado la nomenclatura de las figuras, tablas, ecuaciones así como las referencias bibliográficas que aparecen a lo largo del texto y la mención a los anexos.

Para hacer referencia a la bibliografía, se usará el sistema de orden de aparición en el texto. Se hará una distinción en cuanto a la fuente pudiendo ser bibliográfica, web o normativa.

De este modo en la lista bibliográfica de cada capítulo se indicará el número del orden de aparición dentro del texto, el apellido e inicial del autor o autores, el título del libro, editorial, ISBN, lugar y fecha de publicación si se trata de una referencia bibliográfica como se ve en el siguiente ejemplo.

*[2] Martín-Sanz, J.R. Ejemplo de nomenclatura. Editorial Uva. ISBN 456-21-1324. Valladolid, 2017.*

Si es necesaria la citación explícita dentro del documento, se realizará entre corchetes, indicando con una separación por comas el número de referencia de la bibliografía (por orden de aparición), el autor y el año de publicación. Por ejemplo, la referencia anterior:

*[2, Martín-Sanz, 2017]*

Si la referencia se trata en un trabajo de fin de grado, proyecto o tesis doctoral, el formato en la lista bibliográfica corresponderá al apellido junto con la inicial del autor. Posteriormente el título del trabajo, seguido del centro dónde se realizó, el lugar y la fecha de publicación. Un ejemplo sigue a continuación:

*[5] Martín-Sanz, J.R. TFG “Medidas de ahorro energético en el edificio Lucía”. Uva. Valladolid, 2017.*

La citación explícita en el texto se realizará igual que se hace con una fuente bibliográfica común.

Si la referencia concierne a un artículo científico su referencia en la lista bibliográfica se presentará con el apellido y la inicial del autor. Seguido a esto el nombre del artículo publicado y tras ello la plataforma de publicación y el año de la misma. El ejemplo siguiente ilustra este formato.

*[8] Martín-Sanz, J.R “Energy conservation measures in the Lucía building”. Science trial. 1985.*

La citación explícita en el texto se realizará igual que se hace con una fuente bibliográfica común.

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Si la referencia citada es un artículo en una revista científica concreta, la citación en la lista bibliográfica se hará de la siguiente manera. Apellido e inicial del autor, seguido del título del artículo, la revista dónde se publicó. Ejemplar de la revista, lugar y fecha de publicación y por último las páginas dónde se encuentra el artículo.

Un ejemplo que sirve como ilustración puede ser:

[1] *Martín-Sanz, J.R.* “Procedimientos de cálculo numérico”. El entrevistador. N°321. Madrid 2016. Pp 45-47.

La citación explícita en el texto se realizará igual que se hace con una fuente bibliográfica común.

Si la referencia es un documento publicado por un ente, agencia o instituto, se citará en la lista bibliográfica de la siguiente forma. Título del documento, seguido de la entidad, y el año de publicación. Se muestra un ejemplo a continuación:

[1] “*Programa de eficiencia energética*”. IDAE. 2017

La citación explícita en el texto se realizará igual que se hace con una fuente bibliográfica común.

Si la referencia tiene como objeto una página web, se indicará en la lista bibliográfica con el número del orden de aparición dentro del texto precedido por una letra W, el nombre del dominio y el de la publicación o referencia, la dirección web subrayada y el día de la última consulta. Puede verse un ejemplo a continuación.

[W3] *Google, Estudios sobre la búsqueda.* [www.google.es](http://www.google.es) . Última consulta 28/03/2016.

Para la citación dentro del texto bastará únicamente con exponer entre corchetes la letra W, seguida del número de referencia de la web. Por ejemplo, la citación a la referencia anterior:

[W3].

Si por el contrario es una norma la referencia consultada, se usará el siguiente formato en la lista bibliográfica. Letra N y número de orden de aparición dentro del texto, nombre de la norma. Un ejemplo es el siguiente.

[N12] *Norma UNE-EN-ISO 213564.*

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

La citación dentro del texto se realizará de forma parecida al de una página web. Entre corchetes, el número que indica el orden de aparición dentro del texto precedido de N, para indicar que es una norma. Tomando referencia del ejemplo anterior:

[N12]

Se ha creído conveniente especificar la bibliografía por capítulos para facilitar la búsqueda de información del lector y el entendimiento de la misma.

En cuanto a la nomenclatura de las figuras y las tablas, está se realizará en función del capítulo, apartado y orden de aparición de las mismas. Se identificarán con 3 números. El primer número, vendrá en forma de número romano y hará referencia al capítulo de aparición de las figuras/tablas. Seguido de este y separado por un punto vendrá el número correspondiente al apartado del capítulo y a continuación el orden de aparición del objeto en cuestión separado también por un punto. Posterior a esto, se indica el nombre de la figura o tabla. Por ejemplo:

*Figura II.2.5 Imagen de muestra.*

*Tabla III.1.2 Tabla de muestra.*

La mención a una figura o tabla dentro del texto se realizará entre paréntesis indicando si es una figura o una tabla y seguido de su numeración correspondiente. Utilizando el ejemplo anterior.

*(Figura II.2.5).*

*(Tabla III.1.2).*

Si se ha utilizado una figura o tabla proveniente de un tomo de la bibliografía, esta se indicará en su nombre, al igual que una referencia en el texto, distinguiendo el tipo de fuente, bibliográfica, web o normativa. Pueden verse los tres ejemplos a continuación.

*Figura II.2.5 Imagen de muestra [2, Martín-Sanz, 2017].*

*Tabla III.1.2 Tabla de muestra [W2].*

*Figura I.5.1 Imagen ejemplo [N5].*

Las ecuaciones, por su parte se ha decidido nombrar únicamente con dos números y a la derecha de la misma. Estos números están separados por un punto siendo el primero el número del capítulo al que pertenece en romano y el segundo el orden de aparición de la ecuación dentro del capítulo.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Precedidos a estos se escribe una letra “E” y un guión, para indicar que es una ecuación. Toda la nomenclatura se introducirá entre paréntesis, para hacer una buena distinción de la ecuación y su nombre como puede verse en el siguiente ejemplo.

$$y = x + 2t \quad (\text{E-VI.2})$$

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

---

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

---

## ÍNDICE DEL CAPÍTULO

<b>1. SITUACIÓN ENERGÉTICA.....</b>	<b>27</b>
<b>1.1. SITUACIÓN ENERGÉTICA A NIVEL MUNDIAL.....</b>	<b>27</b>
ACUERDO DE PARÍS .....	29
COMPROMISOS Y OBJETIVOS CLIMÁTICOS .....	29
LA EFICIENCIA ES EL MOTOR DEL CAMBIO .....	30
UNA NUEVA ASIGNACIÓN DEL CAPITAL .....	31
LA POLÍTICA SE CENTRA EN LA INTEGRACIÓN .....	31
LA SENDA HACIA LOS 2 °C ES TORTUOSA: EL CAMINO HACIA 1,5 °C ATRAVIESA UN TERRITORIO INEXPLORADO .....	31
LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y LOS RIESGOS DE LA TRANSICIÓN A BAJAS EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	31
LAS RENOVABLES SE LIBERAN .....	32
LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DEL MUNDO SIGUEN CRECIENDO, PERO MUCHOS MILLONES DE PERSONAS ESTÁN QUEDÁNDOSE AL MARGEN .....	33
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS LISTOS PARA AVANZAR.....	34
ENERGÍA Y AGUA: UNA NO FLUYE SIN LA OTRA.....	35
<b>1.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA A NIVEL NACIONAL.....</b>	<b>35</b>
EVOLUCIÓN DEL CONSUMO EN ESPAÑA .....	36
EVOLUCIÓN SECTORIAL DE LA DEMANDA.....	37
EVOLUCIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	38
CONCLUSIONES DE LA SITUACIÓN ENERGÉTICA EN ESPAÑA .....	40
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO LUCÍA .....</b>	<b>42</b>
<b>2.1. LOCALIZACIÓN.....</b>	<b>42</b>
<b>2.2. EL EDIFICIO .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3. ESTRATEGIAS .....</b>	<b>44</b>
DISEÑO BIOCLIMÁTICO .....	45
ENERGÍA NULA: COGENERACIÓN .....	49
ENERGÍA PRIMARIA: BIOMASA.....	50
INTEGRACIÓN OTRAS ENERGÍAS RENOVABLES: FOTOVOLTAICA Y GEOTÉRMICA.....	52
ORIENTACIÓN E ILUMINACIÓN .....	54
RECUPERACIÓN DE AGUA .....	57
GESTIÓN DE RESIDUOS.....	58

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

<b>2.4. PREMIOS Y CERTIFICACIONES .....</b>	<b>61</b>
PREMIOS .....	61
CERTIFICACIONES.....	62
<b>3. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>65</b>
DESARROLLO HISTÓRICO .....	65
ÚLTIMOS AVANCES .....	70
<b>3.2. ESTADO DEL ARTE DE LAS FACHADAS VENTILADAS .....</b>	<b>72</b>
DEFINICIÓN .....	72
FUNCIONAMIENTO .....	72
ÚLTIMOS AVANCES .....	72
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>74</b>
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....	74
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB .....	75
<b>TABLAS.....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURAS.....</b>	<b>78</b>

---

# 1. SITUACIÓN ENERGÉTICA

---

Antes de comenzar el estudio en el Edificio Lucía, es importante establecer el contexto energético en el que se desarrolla el marco de este Trabajo de Fin de Grado. Para ello, se recurrirá a analizar el mismo tanto en el ámbito mundial como nacional.

## 1.1. Situación energética a nivel mundial

---

En caso de querer conocer cuál es la situación energética a nivel mundial, la primera fuente a la que se ha de acudir es la Agencia Internacional de la Energía (IEA, estas siglas provienen del inglés: International Energy Agency). Esta agencia está formada por un gran número de países: Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Corea, Dinamarca, España, Estados Unidos, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Japón, Luxemburgo, Noruega, Nueva Zelanda, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República Eslovaca, Suecia, Suiza y Turquía. La Comisión Europea también participa en el trabajo de la AIE.

La IEA desarrolla varios tipos de escenarios energéticos, en función de las políticas de los países, y en función del calentamiento global. Para cada uno de estos tipos se establecen 3 escenarios.

Los escenarios en función de las políticas de los países se recogen a continuación:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Tabla I.1 Escenarios en función de las políticas de los países

Escenario	Descripción
Escenario de políticas actuales	Asume que no va a haber cambios en las políticas actuales
Escenario de políticas futuras, también se le conoce como escenario principal	Incluye los cambios en las políticas actuales derivados de planes y compromisos anunciados por los países aunque las medidas para implementar estos cambios no se hayan identificado o anunciado
Escenario 450	Identifica la senda energética que se debería seguir para limitar el calentamiento global a dos grados mediante el límite de concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera a 450 partes por millón de CO <sub>2</sub> .

Los escenarios en función de en función del calentamiento global se recogen a continuación:

Tabla I.2 Escenarios en función del calentamiento global [W1]

Escenario	Descripción
Escenario de 2 °C (2DS <sup>1</sup> )	Escenario necesario para limitar el calentamiento global a 2 °C
Escenario de 4 °C (4DS <sup>2</sup> )	Escenario que tiene el cuenta las promesas recientes de los países de limitar las emisiones y mejorar la eficiencia energética que ayudaría a limitar el calentamiento global a 4 °C
Escenario de 6 °C (6DS <sup>3</sup> )	Escenario que representa las tendencias actuales. El incremento de temperatura esperado respecto de la era preindustrial siguiendo este escenario es de 5,5°C a largo plazo y casi 4°C al final de este siglo

Además, la IEA publica al final de cada año un informe general de la situación energética a nivel mundial, denominado Perspectivas de la energía en el mundo (en inglés, World Energy Outlook, WEO-2016) [W2]. En este informe se

<sup>1</sup> 2DS: Del inglés 2 Degrees Scenario

<sup>2</sup> 4DS: Del inglés 4 Degrees Scenario

<sup>3</sup> 6DS: Del inglés 6 Degrees Scenario

basará este apartado. En los apartados siguientes se desarrollan cada uno de los puntos tratados.

## Acuerdo de París

---

El Acuerdo de París sobre cambio climático, que entró en vigor en noviembre de 2016, es en el fondo un acuerdo sobre energía. Para alcanzar los objetivos de dicho Acuerdo es preciso un cambio transformacional del sector energético, fuente de al menos dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero. Un buen reflejo de esta tendencia es el valor de las subvenciones al consumo de combustibles fósiles. Éstas se redujeron ampliamente en 2015 respecto al año anterior, como se recoge en la siguiente tabla:

Tabla I.3 Subvenciones al consumo de combustibles fósiles

Año	subvenciones al consumo de combustibles fósiles
2014	500 000 millones USD <sup>4</sup>
2015	325 000 millones USD

La tabla anterior refleja tanto el descenso de precios de dichos combustibles, como un proceso de reforma de las subvenciones que ha ganado impulso en varios países.

La transformación del sector eléctrico liderada por las energías renovables ha centrado la atención en un nuevo debate sobre el diseño del mercado de la electricidad y la seguridad eléctrica, si bien las preocupaciones tradicionales por la seguridad energética no han desaparecido. Si añadimos las cuestiones del acceso a la energía y su asequibilidad, el cambio climático y la contaminación ambiental, además de los problemas de aceptación pública de los distintos tipos de proyectos energéticos, existen en el sector energético muchos compromisos, beneficios adicionales y prioridades contrapuestas que deben ser desentrañados.

## Compromisos y objetivos climáticos

---

En general, los países están en vías de lograr, y de superar en algunos casos, muchos de los objetivos fijados en sus compromisos del Acuerdo de París; esto es suficiente para reducir el aumento previsto de emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía, pero no basta para limitar el calentamiento a menos de 2 °C.

---

<sup>4</sup> USD: dólar, del inglés United States Dollar

La transición de China hacia un modelo económico orientado al consumo interno y al área de servicios desempeña un papel crucial a la hora de modelar las tendencias mundiales. La construcción de la infraestructura china durante las últimas décadas se apoyó fuertemente en sectores industriales intensivos en energía, como la industria del acero y del cemento. Sin embargo, la demanda de energía de estos sectores ha sobrepasado ya su punto máximo, y el descenso previsto para 2040 trae consigo una disminución del consumo industrial de carbón. En los países emergentes el carbón como fuente para la generación de electricidad perderá importancia como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla I.4 Proporción de carbón en el mix energético**

Año	China	India
Actualidad	75%	75%
2040	45%	55%

Esto es especialmente considerable teniendo en cuenta los aumentos de demanda eléctrica que tendrán estos países:

**Tabla I.5 Aumento de demanda eléctrica**

País	China	India
Aumento de la demanda	85%	300%

Las principales economías desarrolladas: Estados Unidos, la Unión Europea y Japón parecen estar claramente en vías de lograr sus compromisos climáticos, si bien será vital que estos países introduzcan mejoras suplementarias en materia de eficiencia energética.

## **La eficiencia es el motor del cambio**

---

Es preciso cambiar radicalmente el ritmo de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorar eficiencia energética en el Escenario 450, enfatizando en el mecanismo de revisión quinquenal elaborado en el Acuerdo de París, para que los países sean más ambiciosos en sus compromisos climáticos.

Los frentes de batalla para una mayor reducción de las emisiones se encuentran en el sector eléctrico, a través del desarrollo de las energías renovables, de la energía nuclear (allí donde sea políticamente aceptable) y de la captura y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>; un fuerte impulso para una mayor electrificación y para mejorar la eficiencia energética de todos los sectores de uso final; y un esfuerzo de investigación en materia de energía limpia por parte de los gobiernos y las empresas.

## **Una nueva asignación del capital**

---

En el escenario principal, se necesita una inversión acumulada de 44 billones USD en el suministro energético mundial, de la que un 60% se destinará a la extracción y el suministro de petróleo, gas y carbón –incluidas las plantas eléctricas que usan dichos combustibles–, y casi un 20% a las energías renovables. Además, se requieren 23 billones USD adicionales para mejorar la eficiencia energética.

## **La política se centra en la integración**

---

Las reducciones de costes para las renovables, por su parte, no serán suficientes para asegurar una drástica reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> del suministro eléctrico. Se necesitan cambios estructurales en el diseño y el funcionamiento del sistema eléctrico para garantizar incentivos adecuados de inversión y para integrar proporciones elevadas de energía eólica y solar variable.

## **La senda hacia los 2 °C es tortuosa: el camino hacia 1,5 °C atraviesa un territorio inexplorado**

---

Los desafíos para lograr el Escenario 450 son inmensos y requieren una reasignación importante del capital de inversión destinado al sector energético.

Cuanto más ambicioso sea el objetivo de limitar el calentamiento global, más pronto se alcanzará el punto de cero emisiones netas. La transformación que se requiere para tener una posibilidad razonable de permanecer dentro del objetivo de 1,5 °C es total. Exigiría el logro de cero emisiones netas en algún momento entre 2040 y 2060 (incluso si las tecnologías de emisiones negativas pueden aplicarse a gran escala) y, por ende, una reducción drástica a corto plazo de las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector energético mediante todas las opciones tecnológicas, sociales y regulatorias conocidas.

## **Los combustibles fósiles y los riesgos de la transición a bajas emisiones de CO<sub>2</sub>**

---

Por el momento, la señal colectiva enviada por los gobiernos en sus compromisos climáticos (y reflejada, por tanto, en el escenario principal) indica que los combustibles fósiles, en particular el gas natural y el petróleo, seguirán siendo la base del sistema energético mundial durante muchas décadas, pero la industria de los combustibles fósiles no puede permitirse ignorar los riesgos que podría entrañar una transición más brusca.

Mientras todos los combustibles fósiles siguen creciendo de manera continua en el escenario principal, para 2040 la demanda de petróleo vuelve a los niveles de finales de la década de 1990 en el Escenario 450, por debajo de los 75 millones bdp; el consumo de carbón retrocede a los niveles registrados por última vez a mediados de la década de 1980, por debajo de los 3 000 millones de toneladas equivalentes de carbón al año; solamente el gas registra un aumento relativo con respecto al nivel de consumo actual.

#### *Los mercados petrolíferos podrían verse inmersos en otro periplo tumultuoso*

La escasez de proyectos nuevos podría entrañar un riesgo a corto plazo para los mercados petrolíferos si los recortes de gastos en exploración y producción de 2015-2016 se prolongaran otro año.

A largo plazo, la demanda de petróleo en el escenario principal se concentra en el transporte de mercancías, la aviación y los productos petroquímicos (tres áreas con alternativas escasas), mientras que la oferta de petróleo (pese a las sólidas perspectivas para el petróleo de formaciones compactas estadounidense) se concentra cada vez más en Oriente Medio.

#### *Empieza a vislumbrarse un mercado del gas verdaderamente mundial*

Una tasa de crecimiento anual del 1,5% en la demanda de gas natural en 2040 es saludable en comparación con de la los demás combustibles fósiles, pero los mercados, los modelos de negocio y los acuerdos sobre precios están en constante evolución. Un mercado mundial más flexible, ligado a una duplicación del comercio de gas natural licuado (GNL), refuerza el papel del gas en el mix energético mundial.

#### *Carbón: una roca en un lugar difícil*

Sin ningún repunte en la demanda mundial de carbón a la vista, la búsqueda de un equilibrio del mercado depende de los recortes de la capacidad de producción, fundamentalmente en China y Estados Unidos.

### **Las renovables se liberan**

---

El sector eléctrico es el centro de atención de muchos compromisos de la cumbre de París: en el escenario principal, casi el 60% de toda la capacidad de generación eléctrica nueva en 2040 proviene de las renovables y, para 2040, la mayor parte de esta generación eléctrica es competitiva sin subvención alguna.

En la siguiente tabla se presenta la disminución de costes de las energías renovables:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Tabla I.6 Disminución de costes de las energías renovables

Fuente energética	Reducción de costes
Solar fotovoltaica	40-70%
Eólica onshore <sup>5</sup>	10-25%

En la siguiente tabla se presenta la disminución de subvenciones a las energías renovables:

Tabla I.7 Reducción de subvenciones a las energías renovables

Fuente energética	Reducción de subvenciones
Solar fotovoltaica (China, 2025)	75%
Solar (India, 2030)	100%

En el Escenario 450, se prevé que casi el 60% de la electricidad generada en 2040 provenga de energías renovables y la mitad de ese porcentaje, de las energías eólica y solar FV. En este escenario, el sector eléctrico está prácticamente libre de emisiones de CO<sub>2</sub>.

El descenso en la intensidad media de emisiones de la generación eléctrica según el escenario 450 se puede apreciar a continuación:

Tabla I.8 Intensidad media de emisiones de la generación eléctrica

Año	Intensidad media de emisiones de la generación eléctrica
Actualidad	335 g CO <sub>2</sub> /kWh
2040	80 g CO <sub>2</sub> /kWh

## Las necesidades energéticas del mundo siguen creciendo, pero muchos millones de personas están quedándose al margen

En el escenario principal, un aumento del 30% de la demanda energética mundial hasta 2040 significa un aumento del consumo de todos los combustibles modernos, pero los agregados mundiales ocultan una multitud de diversas tendencias y una significativa sustitución entre combustibles. Además, cientos de millones de personas en 2040 seguirán careciendo de los servicios energéticos básicos.

En términos generales, la energía renovable experimenta, con diferencia, el crecimiento más rápido. El gas natural logra el mejor resultado entre los combustibles fósiles, viendo aumentar su consumo en un 50%. El crecimiento

<sup>5</sup> Eólica onshore: energía eólica producida en tierra, en contraposición a la eólica offshore: energía eólica producida en el mar.

de la demanda de petróleo disminuye durante el período de previsión, pero alcanza los 103 millones de barriles diarios de petróleo (bdp) en 2040. El uso del carbón se ve afectado por preocupaciones medioambientales y, tras la rápida expansión de los últimos años, su crecimiento esencialmente se estanca. El aumento de la producción nuclear es impulsado principalmente por su desarrollo en China.

Mientras la demanda total en los países de la OCDE<sup>6</sup> va en descenso, la geografía del consumo energético mundial sigue desplazándose hacia lugares en plena fase de industrialización y urbanización como la India, el Sudeste Asiático y China, así como hacia determinadas zonas de África, América Latina y Oriente Medio. China y la India experimentan la mayor expansión de energía solar fotovoltaica (FV), mientras que a mediados de la década de 2030 los países asiáticos en vías de desarrollo consumirán más petróleo que todos los países de la OCDE juntos.

Sin embargo, pese a los esfuerzos realizados en muchos países, amplios sectores de la población mundial especialmente concentrados en áreas rurales del África Subsahariana, no tendrán acceso a fuentes de energía modernas. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla I.9 Personas sin acceso a fuentes de energía modernas

Año	Personas sin acceso a electricidad	Personas que dependen de la biomasa sólida para cocinar
Actualidad	1200 millones	2700 millones
2040	Más de 500 millones	800 millones

## Vehículos eléctricos listos para avanzar

La electricidad registra una proporción cada vez mayor del crecimiento del consumo energético final: en 2040 la electricidad representa el 40% del consumo adicional en nuestro escenario principal y dos tercios en el Escenario 450, frente a poco más de un cuarto durante los últimos 25 años.

Los países no pertenecientes a la OCDE representan más del 85% del aumento del consumo de electricidad en ambos escenarios, pero esta última constituye también uno de los vectores energéticos que gana terreno entre los países de la OCDE. Pese a ser un factor pequeño en la demanda total de electricidad, el incremento previsto de consumo eléctrico en el transporte por

<sup>6</sup> OCDE, (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos): organización que ofrece diferentes foros para que los gobiernos de los 35 países que la conforman [W3], trabajen de forma conjunta en buscar soluciones a problemas comunes, compartiendo experiencias e identificando las mejores prácticas para promover "mejores políticas para mejores vidas" [1].

carretera es emblemático de una tendencia más amplia, ya que los coches eléctricos atraen a más consumidores, aparecen más modelos en el mercado y la brecha de precios con respecto a los vehículos clásicos sigue estrechándose.

La evolución del número de coches eléctricos en el mundo se presenta a continuación:

Tabla I.10 Coches eléctricos en el mundo

Año	Coches eléctricos en el mundo
2015	1.3 millones
2025	30 millones
2040	Más de 150 millones
2040 (escenario 450)	715 millones de coches eléctricos

Cabe recalcar que aunque los costes de las baterías siguen descendiendo, las políticas de apoyo –que de momento distan mucho de tener carácter universal– son esenciales para animar a más consumidores a preferir los vehículos eléctricos a los convencionales. Si estas políticas – incluidas unas reglamentaciones más estrictas sobre emisiones y ahorro de combustible, así como incentivos financieros– se vuelven más sólidas y generalizadas, como ocurre en el Escenario 450, la consecuencia será la presencia en las carreteras de 715 millones de coches eléctricos en 2040.

## Energía y agua: una no fluye sin la otra

---

La interdependencia entre la energía y el agua va a intensificarse en los próximos años, ya que las necesidades de agua del sector de la energía –y las necesidades de energía del sector del agua– van en aumento. En este sentido, la gestión de la relación entre la energía y el agua es crucial para el cumplimiento exitoso de una serie de objetivos de desarrollo y climáticos. [2]

## 1.2. Situación energética a nivel nacional.

---

Una vez comentada la situación energética a nivel mundial, es el momento de reducir la escala y evaluar la situación energética a nivel nacional. Para tales efectos, se ha recurrido a al Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. Dentro del Ministerio se encuentra el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). El IDAE publica cada año una memoria anual, que es en la que se basará este apartado. El último informe publicado data de 2014 de modo que no se han podido obtener datos más recientes.

## Evolución del consumo en España

---

El suministro energético en España evoluciona durante los últimos años hacia una estructura más diversificada y equilibrada, con creciente participación de las fuentes de energías renovables y del gas natural. Desde el año 2000 se observa una tendencia al alza en la demanda energética primaria con un punto de inflexión en 2007 (Figura I.1). A partir de entonces se registra una tendencia decreciente y un retroceso en la demanda de los productos petrolíferos y del carbón. Esta tendencia se ha visto reforzada en los últimos años bajo los efectos de la crisis económica. Se ha consolidado así una tendencia bajista que continúa en la actualidad, registrándose en 2014 una disminución del 1,7% en la demanda de energía primaria y un consumo de 118.413 ktep<sup>7</sup>.

Esta disminución responde principalmente a la caída de la demanda del petróleo (1,2%) y del gas natural (9,3%), los cuales cubren conjuntamente el 63% de la demanda. Las restantes fuentes energéticas, salvo las energías renovables, han incrementado su consumo, si bien no lo suficiente como para compensar el retroceso del petróleo y del gas natural. La situación de las energías renovables se ha mantenido prácticamente estable con una ligera disminución del 0,2% en su demanda.

La evolución observada dentro de las energías renovables en 2014, se debe en gran medida a la disminución de la demanda de la biomasa (-9,7%) y de la energía eólica (-3,1%), cuya contribución conjunta alcanza el 56,8% del consumo primario de energías renovables. Con excepción de estas fuentes, los restantes recursos renovables, en general, han aumentado su participación, con incrementos que oscilan entre el 1,7% de la geotermia y el 16,0% de la energía solar. Destaca la evolución de la energía solar, con una contribución que alcanza el 18,0% del consumo total de energías renovables, cifra próxima a la aportación de la energía hidráulica (19,5%). A ello ha contribuido de manera decisiva la energía solar termoeléctrica, que registra un aumento del 24,2% en 2014. En conjunto, la evolución de las energías renovables en 2014 ha mejorado la cobertura a la demanda de energía primaria, alcanzando el 14,6%.

Aunque se está mejorando la capacidad energética de autoabastecimiento, España posee una dependencia energética del orden de un 72%, un 20% más que la media europea [3].

El consumo de energía final y primaria se encuentran íntimamente relacionados. Un aumento de uno de los dos conlleva un aumento del otro y

---

<sup>7</sup> ktep: kilotonelada equivalente de petróleo, proviene de tep: tonelada equivalente de petróleo

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

viceversa. Por tanto, si se habla en términos de la evolución del consumo de energía final por fuentes, su evolución global mostrará también un perfil muy similar al de la energía primaria.

A continuación se presenta la evolución del consumo de energía final por fuentes en el periodo 2000-2014.

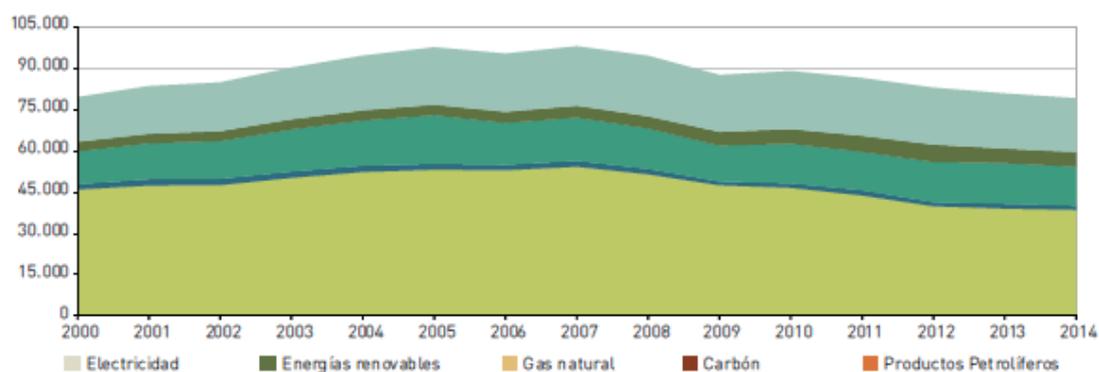


Figura I.1 Evolución del consumo de energía final por fuentes, 2000-2014

### Evolución sectorial de la demanda

No solo es necesario conocer las fuentes energéticas de un país para caracterizar su sector energético. También es necesario conocer los sectores que están utilizando dicha energía. A continuación se abordará la demanda por sectores.

La estructura de consumo energético por fuentes evoluciona en coherencia con la demanda sectorial, caracterizada por el protagonismo del sector transporte, con cerca el 40% del consumo total, según la última información disponible en 2013. Le sigue el sector industrial, cuya participación en la demanda mantiene una tendencia progresiva a la baja, con el 25,7% de la demanda total en 2013, lo que contrasta con el peso creciente de la demanda agregada del conjunto de los sectores agrupados bajo la categoría «Usos diversos»<sup>8</sup>, quienes desde el 2006 superan la demanda de la industria, alcanzado el 33,9% de la demanda de energía final en 2013.

El importante peso del sector transporte en la demanda global junto a la estructura de su demanda, con un claro predominio, de los productos petrolíferos, explica su impacto en la dependencia energética, y en el medio ambiente. Ello justifica la necesidad de potenciar actuaciones de eficiencia y de sostenibilidad energética en este sector, que ya es destinatario de gran

<sup>8</sup> Usos diversos: Residencial, servicios y agricultura y otros.

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

parte de los programas vigentes en materia medioambiental, de eficiencia energética y de promoción de fuentes de propulsión alternativas, siendo buena parte de ellos gestionados por el IDAE.

A continuación se presenta la estructura sectorial de la demanda de energía final, en el periodo 2000-2013:

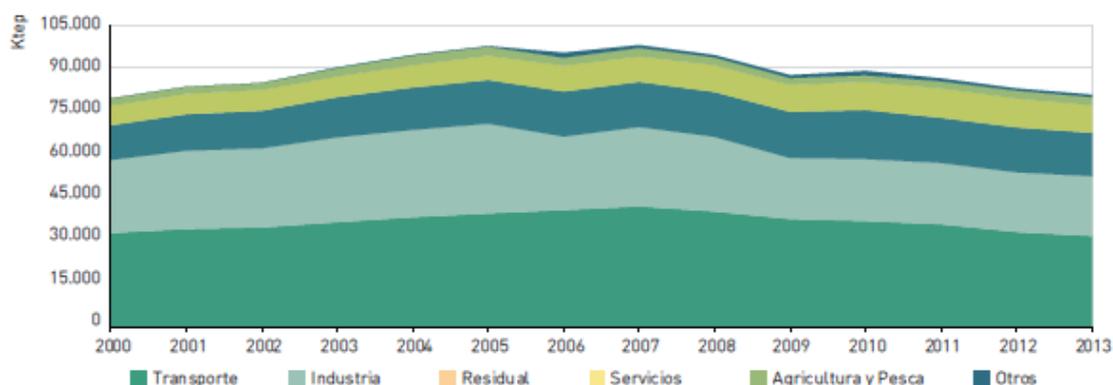


Figura I.2 Estructura sectorial de la demanda de energía final, 2000-2013

### Evolución de las energías renovables

En este apartado se aportarán datos acerca de la evolución que han tenido las energías renovables.

Las energías renovables mantienen una contribución ascendente al suministro energético en España, coincidiendo con el impulso de los sucesivos Planes nacionales de energías Renovables, 2005-2010 y 2011-2020.

Aunque la mayoría de las tecnologías renovables reducen sus aportaciones a la demanda primaria en el último año, cuatro de ellas registran crecimientos. Liderando este grupo se sitúan las tecnologías solares, con un incremento global del 16% con respecto al año anterior. Dentro de ellas las centrales solares termoeléctricas aumentan sus contribuciones un 24,2 % con respecto a 2013, mientras que las instalaciones solares térmicas equipadas con captadores solares lo hacen en un 8,5%. Por su parte, los biocarburantes y la geotermia incrementan sus aportaciones en un 6,7% y 1,7%, respectivamente.

Esto se puede ver en la siguiente imagen:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

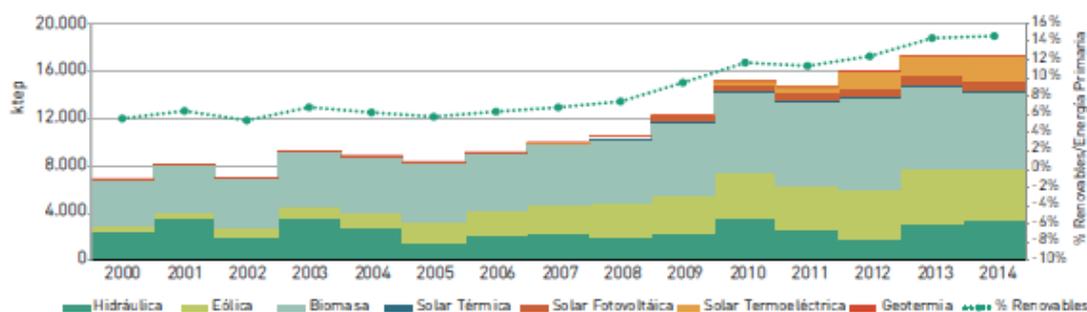


Figura I.3 Evolución del consumo de energía primaria de renovables según tecnologías, 2000-2014

Respecto a la generación eléctrica, la producción bruta de origen renovable (bombeo excluido) en 2014 es de 110.081 GWh, un 1,3% superior a la del 2013. Este incremento viene de la mano de los recursos solares termoeléctricos y de los hidráulicos, cuyas producciones aumentan un 24,2% y un 4,8% respectivamente. Las restantes tecnologías renovables experimentan en 2014 una merma en sus producciones eléctricas, desde un 7% para las instalaciones alimentadas por biogás hasta un 1,2% en las centrales fotovoltaicas, pasando por reducciones del 3,6% en centrales de biomasa, del 3% en parques eólicos y del 1,7% en plantas de generación eléctrica mediante residuos sólidos urbanos.

La estructura de Estructura de generación eléctrica según tecnologías en 2014 fue la siguiente:

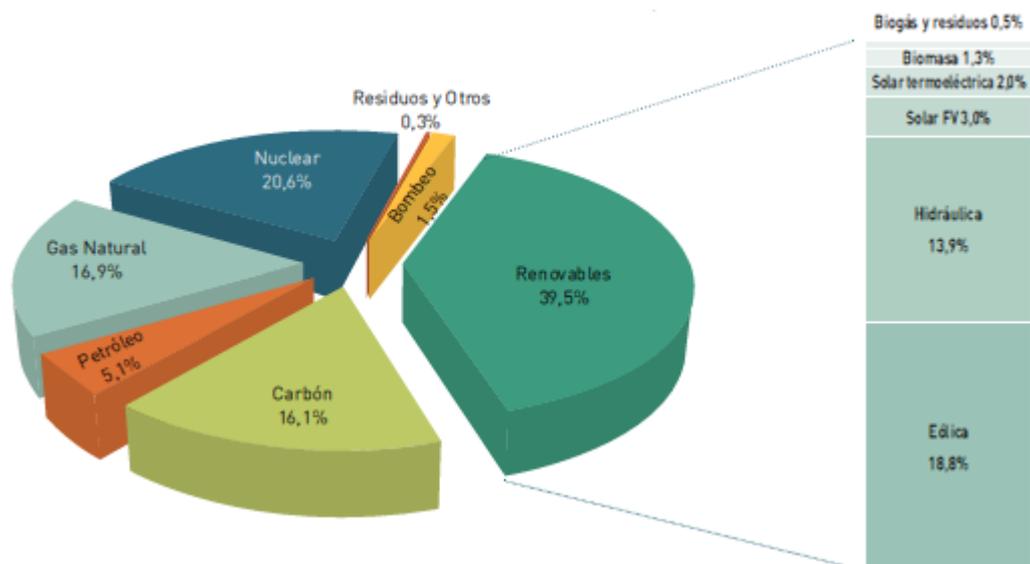


Figura I.4 Estructura de Estructura de generación eléctrica según tecnologías, 2014

En conjunto, la evolución de las energías renovables aumenta su contribución a la cobertura de la demanda eléctrica total desde el 38,9% en 2013 hasta el

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

39,5% en 2014. Donde se aprecia el importante papel de las energías renovables en la generación de electricidad.

Por último cabe reseñar la distribución de la capacidad de producción de energía con fuentes renovables en 2014. Ésta es ligeramente superior a 17 millones de tep. Se destina mayoritariamente (69,4%) a aplicaciones vinculadas a la producción eléctrica, mientras que la diferencia restante se distribuye entre aplicaciones térmicas y de transporte. Esto se puede apreciar en la siguiente imagen:

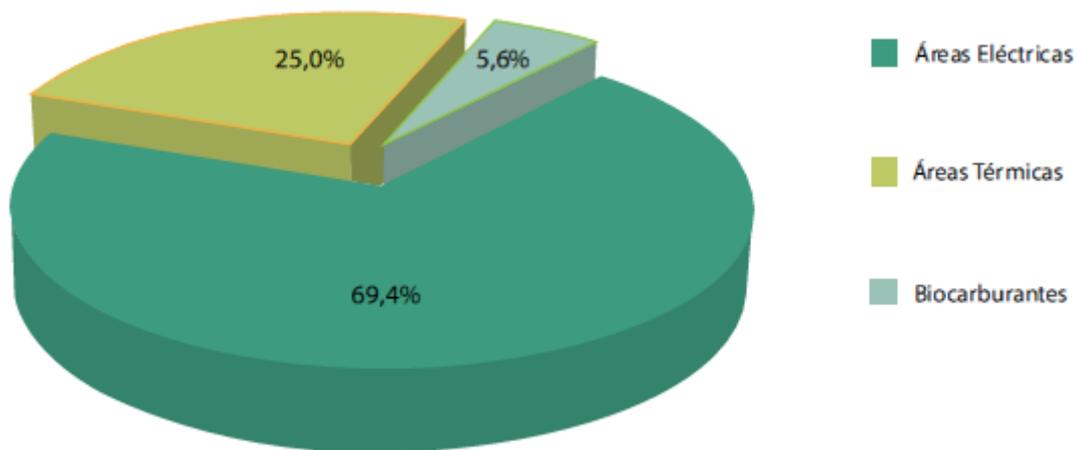


Figura I.5 Distribución de la capacidad de producción de energía con fuentes renovables, 2014

## Conclusiones de la situación energética en España

---

De toda la información aportada en los apartados anteriores se extraen varias conclusiones:

- La principal fuente energética en España es el petróleo.
- El principal consumidor energético en España es el sector transporte.
- La producción de energías renovables está en aumento .
- España es un país altamente dependiente energéticamente. Para reducir esta dependencia es necesario un mayor aumento de la producción autóctona y diversificada. En este sentido las renovables juegan un papel crucial.

Para llevar a cabo estos objetivos se plantean acciones en dos sentidos: el aumento de la eficiencia energética y el fomento del ahorro de energía y la

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

potenciación de la entrada de energías renovables autóctonas de distinta naturaleza en el mercado.

### *Aumentar la eficiencia energética y fomentar el ahorro de energía.*

La energía menos contaminante es la que no se usa. Por ello se debe intentar crear sistemas energéticos eficientes y desterrar los antiguos e ineficientes. De esta modo, sin alterar el desarrollo de la técnica, se conseguirá un ahorro energético considerable.

Tampoco hay que dejar de lado el factor humano. La educación y concienciación global de los ciudadanos es importante para conseguir un ahorro de la energía. Es necesario que en el sector residencial que abarca un 16% del consumo global, se tenga conciencia de los problemas energéticos a nivel nacional e internacional y de esta manera colaborar en la mejora de la estructuración del sistema energético Español.

### *Potenciar la entrada de energías renovables autóctonas*

España, al no ser productor de petróleo presenta una importante dependencia exterior, especialmente en relación al petróleo, que hoy día sigue siendo la principal fuente de energía en el país. Esto puede provocar problemas de seguridad de abastecimiento, especialmente en un panorama internacional incierto como el que se está viviendo en los últimos años, con amplias fluctuaciones de precio de las fuentes energéticas en tiempos reducidos.

En este contexto, la potenciación de energías renovables con carácter autóctono supone una mayor seguridad de abastecimiento al reducir la dependencia de las fuentes energéticas del exterior [4].

---

## 2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO LUCÍA

---

Una vez analizado el contexto energético mundial y nacional, se comenzará a describir el Edificio Lucía, que será el lugar en el que se realice el estudio.

### 2.1. Localización

---

El Edificio Lucía se encuentra en la localidad de Valladolid, situada en la meseta norte. Esta zona se caracteriza por su amplia variedad de temperaturas durante el año, que va desde inviernos fríos a veranos cálidos.

Dentro de Valladolid el edificio se encuentra dentro de Campus Miguel Delibes de la Universidad de Valladolid.



Figura I.6 Localización del Edificio Lucía

## 2.2. El edificio

---

El edificio Lucía es propiedad de la Universidad de Valladolid. Este fue inaugurado en 2014. La palabra Lucía es un acrónimo que se corresponde con Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. Se trata por tanto de un edificio destinado a la investigación.



Figura I.7 Edificio Lucía

El edificio supone una inversión inicial de 8.560.000 €, para una superficie total construida de 7.500 m<sup>2</sup> de los que 4.300 se dedican a laboratorios y módulos de trabajo asociados. Por espacios, cuenta con: Edificio de laboratorios y espacios para spin-off relacionados con la nutrición, alimentación y dietética (2.100 m<sup>2</sup>); metabopatías (2.100 m<sup>2</sup>) y el desarrollo de la Sociedad Digital del Conocimiento (950 m<sup>2</sup>).

Pero el edificio no solo servirá a la investigación durante su uso ya que este se ha diseñado como base donde investigar sobre los aspectos sociales de la edificación sostenible; prototipo para verificar hipótesis sobre las cuales se asientan los métodos y evaluación medioambiental de edificios; e investigar sobre aspectos que arrojen luz sobre temas hasta ahora sin paramétrica, utilizando únicamente energías renovables.

Las claves para conseguirlo se basan fundamentalmente en:

- el ahorro energético; la reducción del consumo de agua
- la utilización de materiales de bajo impacto medioambiental

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

- la gestión de residuos que se producirán en el edificio tanto en las fases de construcción y uso, como en la de demolición futura, con estrategias para desmontaje, reutilización y reciclado.

El diseño bioclimático, el incremento del aislamiento, la ventilación pasiva y otras estrategias, permiten una reducción de la demanda energética en más del 50%.

En iluminación se consigue un ahorro del 45% en el gasto mediante un 46% de superficie acristalada, el especial tratamiento de huecos, los dispositivos de iluminación cenital (tubos de luz) y regulación de las luminarias en función de la luminosidad exterior...

En relación con un edificio estándar de similares características, el ahorro del gasto en energía (gas y electricidad principalmente) es superior al 60%. A lo que se añadiría la energía cedida a otros edificios anejos. El ahorro en estos otros edificios sería del 30%.

La energía se produce mediante un sistema de trigeneración con biomasa que genera la electricidad necesaria, calefacción, agua caliente y refrigeración. Se utiliza también energía fotovoltaica y pozos geotérmicos. Se genera así un Edificio de Energía Nula.

Se puede afirmar que el edificio tiene un balance 0 (CERO) de CO<sub>2</sub> [W4].

## 2.3. Estrategias

---

Como se ha venido diciendo, el edificio Lucía supone un importante avance en dirección a los edificios de Energía casi nula. Es importante recalcar que para alcanzar esto es necesaria la integración de diferentes estrategias en diferentes ámbitos, ya que, por ejemplo, de nada sirve ser muy eficiente en la generación si luego el edificio no está correctamente aislado y tiene importantes pérdidas a través de los cerramientos.

Las estrategias que fueron utilizadas en el Edificio Lucía fueron las siguientes:

- Diseño Bioclimático, Energía nula: Cogeneración
- Energía primaria: Biomasa
- Integración otras energías renovables: Fotovoltaica y Geotérmica
- Orientación e iluminación
- Recuperación de agua
- Gestión de residuos

En este apartado se describirán cada una de las estrategias utilizadas en el Edificio Lucía:

## Diseño Bioclimático

Dentro del diseño del edificio se pueden resaltar varios aspectos.

### *Compacidad:*

El edificio presenta un factor de forma 0,37 m<sup>-1</sup> para sus 5.920 m<sup>2</sup> útiles acondicionados, lo que supone un ratio difícilmente mejorable. La compacidad implica optimizar la relación entre la superficie envolvente y el volumen climatizado, reduciendo la primera. Se ha combinado este principio con importantes estrategias para conseguir simultáneamente una buena iluminación natural de los espacios de trabajo, como se desarrollará más adelante.

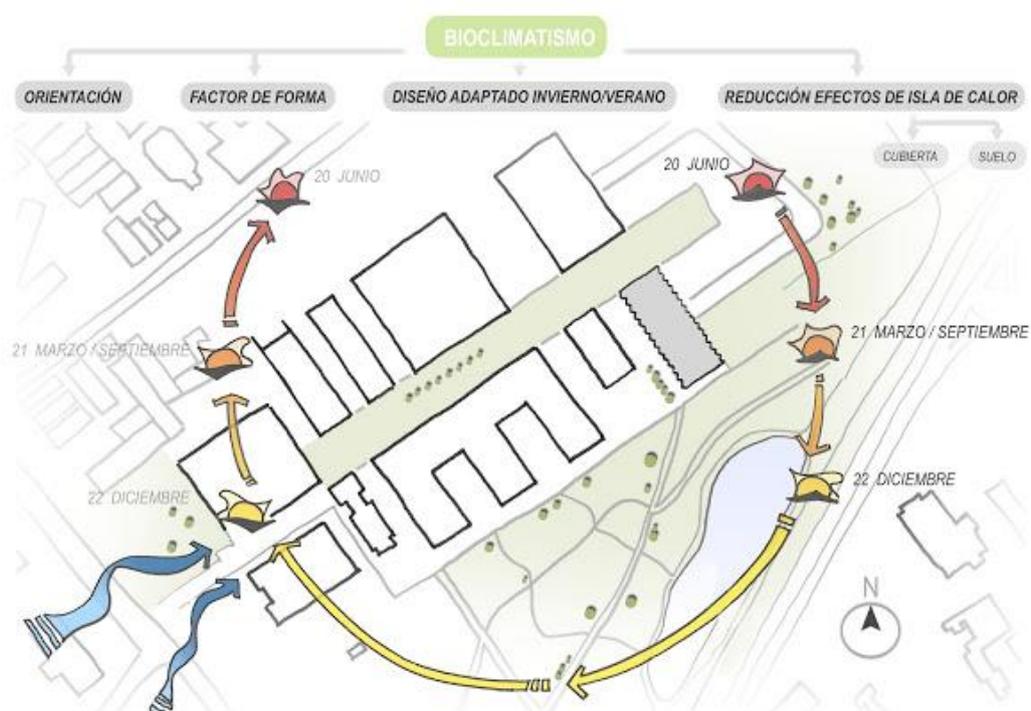


Figura I.8 Diseño Bioclimático

### *Cuidadoso análisis de la incidencia solar en los huecos:*

La forma del solar exige largas fachadas en orientaciones Sur-Oeste y Norte-Este, por lo que se ha realizado un cuidadosísimo estudio de re-orientación en el diseño de los huecos combinado con los aleros en las orientaciones soleadas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Los huecos, con este sistema, se orientan al Sur y al Este en una proporción del 89% de su superficie, lo que produce ganancias térmicas en invierno, un efecto de auto-

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

sombreamiento en verano que reduce las cargas de refrigeración, y al mismo tiempo se asegura la iluminación natural. La superficie resultante presenta un efecto de diente de sierra en sus lados más largos, y como inconveniente, se aumenta la superficie envolvente, lo que se contrarresta con la siguiente medida (Aumento de los aislamientos en la envolvente térmica). El efecto de esta estrategia de diseño supone un 24% de reducción en las cargas de refrigeración del edificio, según las simulaciones realizadas.



Figura I.9 Planta tipo. (Efecto dentado en el diseño de huecos para reorientar los huecos en fachadas Norte-Este y Sur-Oeste.)

### *Aumento de los aislamientos en la envolvente térmica*

Se relatan en la Tabla I los coeficientes de transmisión térmica utilizados en la envolvente del edificio en comparación con los exigidos por el español CTE y por normativa americana ASHRAE (ASHRAE 2007). Los coeficientes de aislamientos utilizados, muy importantes, ( $U=0,17$  W/m<sup>2</sup>K en fachadas y  $U=0,15$  W/m<sup>2</sup>K en su cubierta vegetal) limitarán las pérdidas por transmisión y por tanto reducción de la demanda. Como contraindicación, hay un aumento de la energía incorporada en los materiales que puede ser reducido e incluso eliminado por el empleo de aislantes de origen natural (corcho aglomerado negro 100% natural), y un sobrecoste económico a compensar por la reducción en consumo de energía. Debe ser también considerado en este apartado el efecto de la inercia térmica conseguido en la propia estructura del edificio (hormigón armado) y sobre todo con la cubierta, de tipo vegetal extensivo en el 73,5% de su superficie.

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Tabla I.11 Coeficientes de transmisión térmica empleados en el edificio LUCIA en comparación con los exigibles según CTE y ASHRAE

CERRAMIENTOS OPACOS					CERRAMIENTOS TRASLUCIDOS						
			CTE	ASHRAE	LUCIA				CTE	ASHRAE	LUCIA
AISLAMIENTO	FACHADA	W/m <sup>2</sup> .K	0,66	0,36	0,17	AISLAMIENTO	SUR	W/m <sup>2</sup> .K	3,40	2,84	1,10
	CUBIERTA		0,38	0,27	0,15		NORTE		2,20	2,84	1,10
	SOLERAS		0,49	0,22	0,16		O y E		2,60	2,84	1,10
						F SOLAR	%		54,00	40,00	62,00
						PROP/MACIZO	%		60,00	40,00	46,00

En las siguientes tablas podemos ver la descomposición de cálculo del cerramiento y la cubierta ajardinada.

Tabla I.12 Cálculo del cerramiento

CERRAMIENTO									
CERRAMIENTO MACIZO EDIFICIO LUCIA									
elemento	e	$\lambda$ (W/mK)	$R=e/\lambda$ (m <sup>2</sup> K/W)	$R_{s,i}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$R_{s,e}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$\Sigma R$	$U=1/\Sigma R$	W/m <sup>2</sup> K	
a-panel hormigón	0,05	1,9	0,026						
b-panel hormigón									
EPS	0,06	0,036	1,667						
c-panel hormigón	0,05	1,9	0,026						
aislante imv	0,14	0,036	3,889						
cámara aire n/v	0,05	0,18	0,278						
placa cartón yeso	0,015	0,25	0,060						
				5,946	0,130	0,040	6,116		0,164

Tabla I.13 Cálculo de la cubierta ajardinada

CUBIERTA									
CUBIERTA VEGETAL EDIFICIO LUCIA 2									
elemento	e	$\lambda$ (W/mK)	$R=e/\lambda$ (m <sup>2</sup> K/W)	$R_{s,i}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$R_{s,e}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$\Sigma R$	$U=1/\Sigma R$	W/m <sup>2</sup> K	
forjado horm	0,30	2,500	0,120						
horm ligero form pend	0,06	1,350	0,044						
lámina impermeable pvc	0,00	0,250	0,008						
fieltro	0,00	0,170	0,009						
XPS 35kg/m <sup>3</sup>	0,20	0,035	5,714						
fieltro	0,00	0,170	0,009						
capa drenante	0,02	0,170	0,118						
fieltro	0,00	0,170	0,009						
sustrato vegetal	0,10	0,520	0,192						
				6,223	0,100	0,040	6,363		0,157

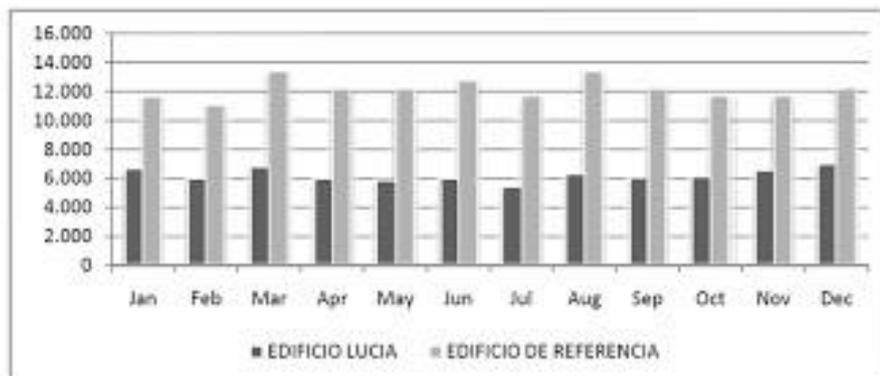
### Iluminación natural con pozos de luz:

La decisión de realizar un edificio compacto se ha combinado con el aumento de la iluminación natural en los espacios interiores mediante el uso profuso de pozos de luz (en total 27) y de lucernarios sobre los cuerpos de escaleras. La iluminación natural, además de tener efectos beneficiosos sobre la salud y el bienestar, reduce la demanda eléctrica de iluminación artificial (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los beneficios obtenidos por este sistema son excelentes: se trata de elementos estáticos, que utilizan simplemente el efecto del reflejo de la luz incidente, por lo que no requieren energía para su funcionamiento. Según la simulación realizada, los 146.190 kWh anuales para iluminación que necesitaría el edificio de referencia (criterio ASHRAE), en el LUCIA se reducen a 74.790 kWh (aproximadamente la mitad) gracias a estos dispositivos. El coste de estos 27 dispositivos se valora en el presupuesto de proyecto en 13.483 euros €.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Tabla I.14 Comparativa de los sistemas de iluminación, de un edificio normal y el edificio LUCIA

SISTEMAS DE ILUMINACIÓN (KWH)



ILUMINACIÓN	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
LUCIA (KWH)	6.640	5.990	6.810	5.960	5.800	5.980	5.420	6.330	6.040	6.070	6.480	6.980	74.490
REFERENCIA (KWH)	11.650	11.070	13.400	12.230	12.230	12.810	11.650	13.400	12.230	11.650	11.650	12.230	146.190

Estos datos fueron obtenidos del informe de simulación energética con el sistema DOE-2 de cálculos energéticos y análisis de costes y el programa EQUEST 3.64

*Diseño abierto del aparcamiento:*

Esta decisión, además de aportar mejoras sensitivas (en un aparcamiento es mucho más agradable el espacio abierto frente al cerrado), permite tener ventilación e iluminación naturales que reducen enormemente las demandas de iluminación, equipos anti-incendio, anti-CO2, etc., a suplir por energía externa. Como contraindicación está la reducción de seguridad anti-robos. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura I.10 Sección axonométrica. Pozos de luz, aparcamiento abierto y central de biomasa

### Energía nula: Cogeneración

El edificio utilizará exclusivamente energías renovables: fotovoltaica, geotérmica y biomasa para todas sus necesidades, incluida la energía eléctrica necesaria. En Castilla y León la posibilidad de utilizar biomasa de residuo forestal es notable, y su uso permite mejorar las circunstancias socio-económicas de la zona. La relación entre uso de biomasa y creación de puestos de trabajo es importante. Permite pensar en climatización por distrito en el ámbito del campus universitario, y los accesos y superficie del solar hacen fácil su suministro, por lo que el uso de biomasa es idóneo para el caso.

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

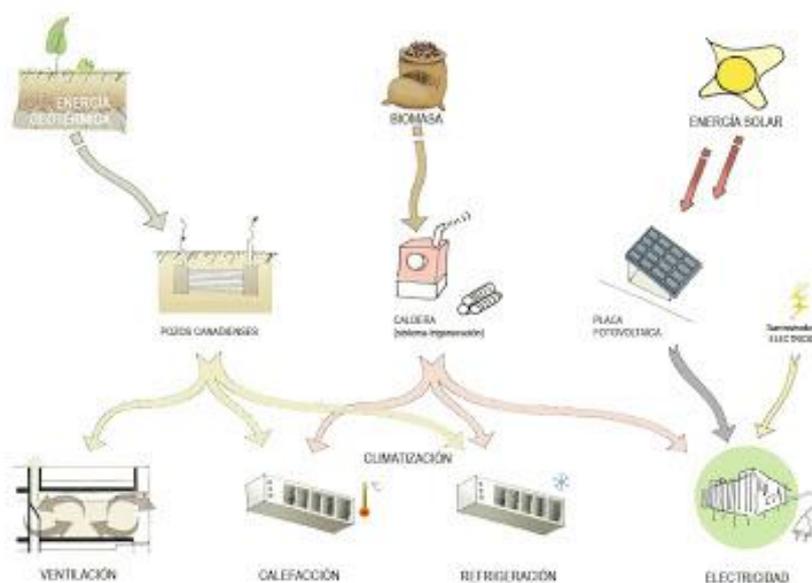


Figura I.11 Fuentes energéticas

Se decidió pues utilizar un sistema de cogeneración de biomasa para la producción total de necesidades del edificio: climatización (calefacción, refrigeración) y producción de electricidad. Se facilita el 100% de la demanda energética con biomasa, y la cogeneración permite exportar a otros edificios del campus, incluyendo dentro del presupuesto total del edificio (el presupuesto, en ejecución material, con el que se está realizando en estos momentos el edificio, incluida la central de cogeneración de biomasa, es de 694 euros/m<sup>2</sup>). Esto hace fomentar la investigación en la utilización de sistemas de producción de energías renovables. La producción de energía renovable en la parcela, según la herramienta de simulación E-Quest es de 249.108 kWh mediante la cogeneración de la caldera de biomasa.

### Energía primaria: Biomasa

Se explotará un recurso local (la biomasa) en exclusiva para su uso en la edificación, tanto para la climatización en su totalidad como para la producción de la energía eléctrica necesaria para el edificio, e incluso exportar a otros edificios de la propio campus en forma de distrito. El uso de la biomasa de residuo de los tratamientos de las masas vegetales de la industria piñonera y maderera (astillas), tiene un gran potencial en la región como creador de empleo local, por lo que la investigación en la aplicación de este recurso de forma exhaustiva en la edificación obtendrá beneficios en muchos aspectos.

La explotación de un recurso excedentario en la región donde se construye el edificio, la biomasa, implica una importante repercusión socio-económica que

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

abre camino, además de puesto de trabajo, a la autosuficiencia energética. El potencial explotable de la biomasa de la región en este sector es muy alto y muy desaprovechado: en 1990, este recurso suministró el 9% de la producción de energía primaria frente al posible 78%. Se espera, además, que proyectos de este tipo contribuyan a aumentar la investigación sobre la autonomía energética local, produzcan mejoras sociales y puesto de trabajo, e impulsen el desarrollo medio de la eficacia de los sistemas existentes para la explotación en edificios de la biomasa, aún en sus comienzos, según Intelligent Energy Europe (IE EUROPE, 2007) [W5].

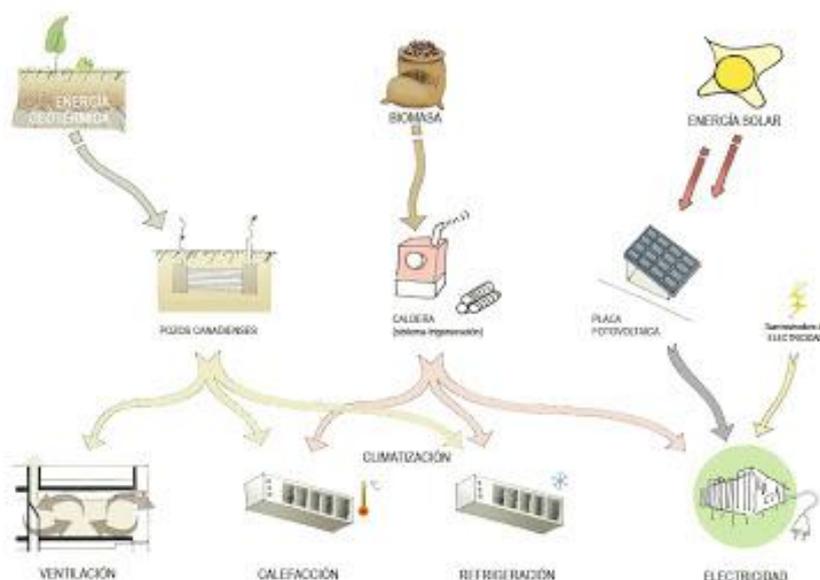


Figura I.12 Fuentes energéticas

La decisión de utilizar biomasa se circunscribe además a otros dos aspectos: la reducción de CO<sub>2</sub> y el fomento por el desarrollo de sistemas que permitan la utilización de este recurso en condiciones de competencia con los combustibles fósiles. Se eligió para ello un sistema de co-generación: el potencial energético de la biomasa mediante un motor de vapor produce la electricidad necesaria, y la recuperación del calor asociada a esta producción permite abastecer la demanda de calefacción, agua caliente y refrigeración (máquina de absorción), pudiendo, además de suplir todas las necesidades del edificio, inyectar a los edificios anejos del Campus el remanente de energía generada. La potencia eléctrica generada será de 100 kW, y la potencia útil aprovechable en forma de calor de 770 kWt. El rendimiento eléctrico equivalente será del 70%. Según el programa de simulación utilizado, EQU<sub>EST</sub> 3.64, la energía final en el mantenimiento de todas las necesidades energéticas del edificio es de 233 kWh/m<sup>2</sup>, y energía primaria de 218 kWh/m<sup>2</sup>.

## Integración otras energías renovables: Fotovoltaica y Geotérmica

### SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

El diseño arquitectónico del edificio integra sistemas fotovoltaicos en dos espacios idóneos: el muro tipo cortina de doble piel en la fachada Sur-este (donde se encuentran los espacios comunes de descanso) y dos lucernarios sobre cada uno de los cuerpos de escaleras. Los propios paneles fotovoltaicos, y la doble piel permiten filtrar esta fuerte incidencia de luz natural al interior. La fachada de doble piel produce anualmente 5.000 kWh y los lucernarios 5.500 kWh, lo que supone un ahorro anual de 3.570,00 euros. Contribuyen al balance positivo de energías renovables del edificio e impulsan la investigación en esta materia, de forma que los lucernarios permitan, además de producir energía eléctrica, colaborar en la climatización del edificio tanto en invierno como en verano. Suponen un sobrecoste económico compensado por la reducción constante en consumo de energía, la aplicación en investigación y la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.



Figura I.13 Ventajas de los paneles fotovoltaicos.

Tabla I.15 Balance de costes y ahorros de las energía limpias incorporadas al edificio

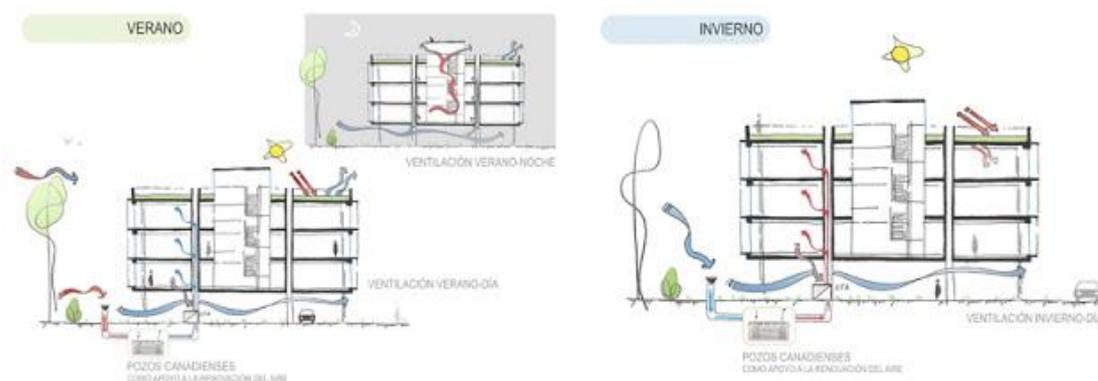
MEJORA	COSTE ECONÓMICO	AHORRO ENERGÉTICO	AHORRO ECONÓMICO
Fachada fotovoltaica de doble piel	60.500 €	5.000 kWh eléctricos	1.700 €/año
Lucernarios fotovoltaicos	44.000 €	5.500 kWh eléctricos	1870 €/año
Pozos canadienses	34.000 €	25.000 kWh térmicos - 2.7000 kWh eléctricos	- 6€/año

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Sobre el muro de doble piel fotovoltaico existe un informe realizado por Pich-Aguilera. Este informe es de gran importancia debido a que el estudio posterior se realizará precisamente en esta zona y este aportará una gran cantidad de datos. Entre estos datos podemos citar las dimensiones de la doble piel, la estrategia de funcionamiento, las pérdidas energéticas por sombras... [5]

### *MICROCLIMAS Y GEOTERMIA DEL SOLAR*

El solar tiene una extensión suficiente que permite crear ciertas condiciones ambientales externas para crear microclimas mediante la vegetación, e incluso auxiliar los sistemas de ventilación con tubos geotérmicos en el exterior del edificio. Este sistema, que aclimata el aire exterior de forma natural antes de introducirlo en el sistema de ventilación, puede considerarse tanto un dispositivo bioclimático como producción energética renovable.



**Figura I.14 Esquemas de ventilación: verano e invierno**

La reducción del efecto isla de calor en la parcela y la creación del microclima se consigue mediante el uso de pavimentos filtrantes en exterior al edificio; cubierta vegetal intensiva tipo sedum en el 73,5% de su superficie; vegetación autóctona y árboles caducos en la parcela como elementos que contribuyen a crear microclimas.

En cuanto a la creación de este microclima externo, otra decisión tomada al respecto es la de diseñar un aparcamiento abierto y al aire libre, con pavimento filtrante de losa calada. Esta decisión, además de aportar mejoras sensitivas (en un aparcamiento es mucho más agradable el espacio abierto frente al cerrado), permite tener ventilación e iluminación naturales que reducen enormemente las demandas y equipos a suplir por energía externa, como iluminación, protección contra incendios, sistemas anti-CO<sub>2</sub>, etc.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura I.15 Pozos canadienses en construcción

## Orientación e iluminación

---

A continuación se muestran las mejoras en orientación e iluminación.

### *Soleamiento, huecos y formas*

Los huecos han sido estudiados con bastante detalle y precisión. La orientación del edificio, con largas fachadas Este y Oeste, no es la idónea para favorecer las vistas más agradables, ni para proceder al óptimo confort, por lo que supone su sobrecarga de radiación solar. Por ello se redirigen los huecos hacia la orientación Sur, formando el efecto de dientes de sierra, que cierra al Norte y al Oeste el edificio, abriendo todos los espacios al Sur y al Este, las mejores orientaciones desde el punto de vista bioclimático y donde se encuentran las vistas más abiertas y con más horizonte. Los huecos, con este sistema, se orientan al Sur y al Este en una proporción del 89% de su superficie. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

---

Figura I.16 Diente de sierra y parasoles para producir efecto de auto sombra

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Este zigzag, junto con los parasoles que protegen todos los huecos, produce un efecto de auto-sombra que reduce las cargas de refrigeración sin limitar la iluminación natural (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Según las simulaciones realizadas, y analizando comparativamente los edificios simulados 1 y 3, y al mismo tiempo los 2 y 4, se concluye que el efecto de auto-sombra del diseño supone una reducción de la demanda de refrigeración de un 27 % en un edificio de estricto cumplimiento del CTE, y que en el edificio LUCIA, acompañado de otras estrategias de iluminación, supone un ahorro en la demanda de refrigeración del 29,6%, y en la comparación con el método E-Quest, que permite establecer diferencias directas entre un edificio “de fachada recta” y el de la “fachada orientada”, el ahorro estimado por el efecto autosombra es de un 54% (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La solución del zigzag, además de mejoras sensibles de bienestar para los usuarios, tiene evidentes ventajas térmicas y económicas. Ha de tenerse presente la importancia en España de la refrigeración, necesaria en varios meses al año.

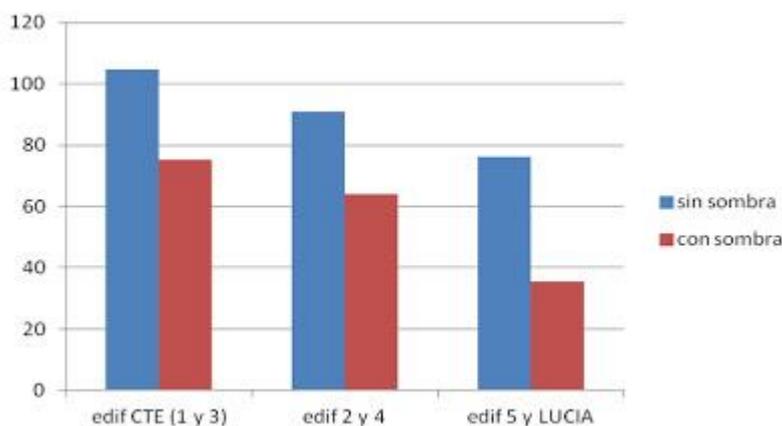


Figura I.17 Reducción de la demanda de refrigeración en kWh/m2año con el efecto de autosombreamiento entre los diversos edificios de referencia y LUCIA

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

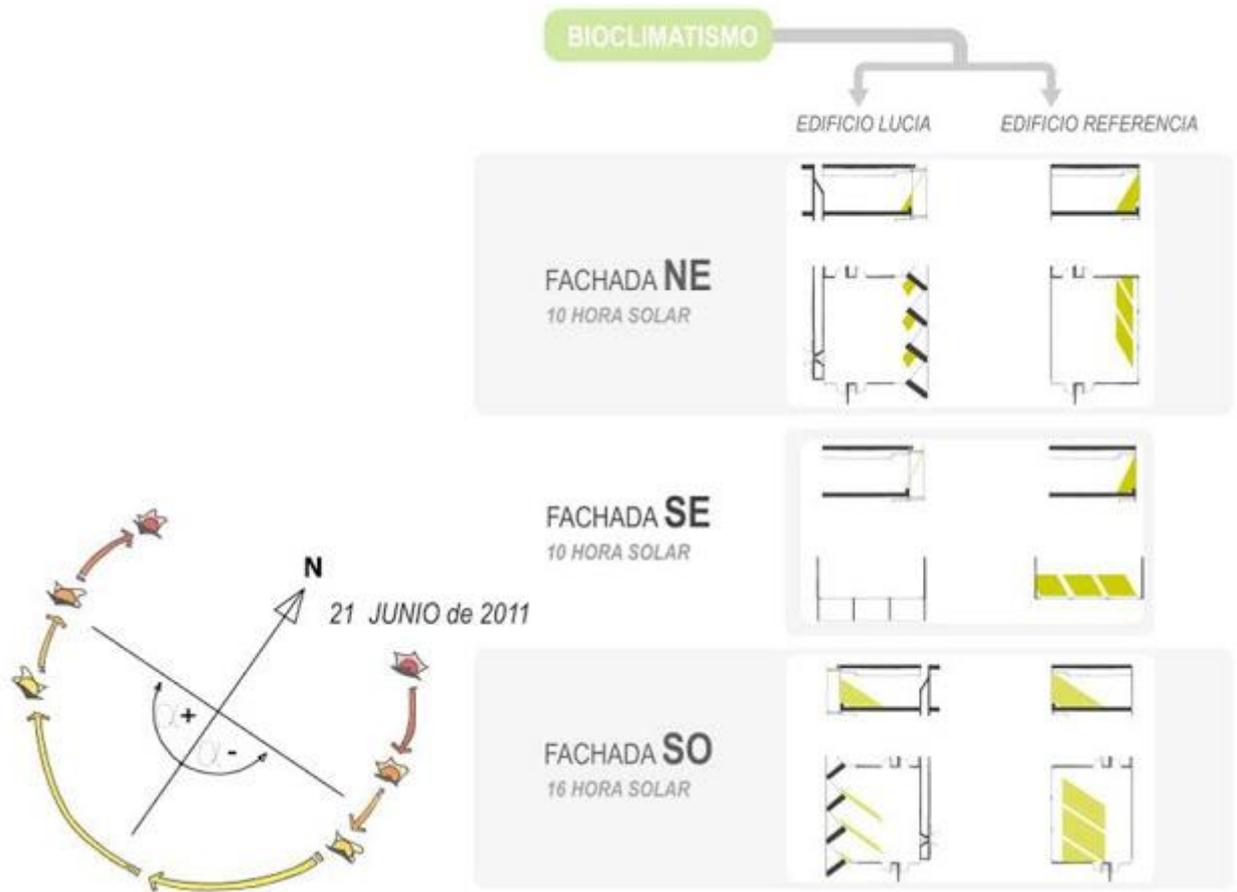


Figura I.18 Resumen comparativo de iluminación directa entre diversos edificios de referencia y LUCIA

*Forma e iluminación natural*

La forma compacta del edificio, buena para la reducción de pérdidas térmicas, tiene como contrapartida implementar la iluminación natural de los espacios interiores. Para ello, los espacios de circulación, escalera y junto a los ascensores introducen iluminación natural cenital mediante claraboyas o lucernarios, sobre los que se situarán los módulos fotovoltaicos con otros dos objetivos: tamizar la luz y producir energía eléctrica. A estos se le suman la fachada acristalada el sur-este, formada por doble piel fotovoltaica que introduce luz tamizada al interior y al mismo tiempo produce electricidad. Y, finalmente, los dispositivos o pozos de luz situados en la parte interna de cada despacho o laboratorio aumentan el nivel de iluminación natural, transmitiéndola directamente desde la cubierta a cada una de las plantas. Estos dispositivos, además de ampliar la iluminación natural en el interior, suponen una importante reducción de demanda energética en iluminación. La media de consumo de iluminación en oficinas, que es de 38,90 kWh/m<sup>2</sup>año,

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

según la Comunidad de Madrid, sin embargo ésta se reduce en el LUCIA a 12,60 kWh/m<sup>2</sup> año.

De acuerdo con la simulación realizada, los 146.190 kWh anuales para iluminación que necesitaría el edificio de referencia (criterio de la normativa americana ASHRAE), en el LUCIA se reducen a 74.790 kWh (prácticamente la mitad) gracias a estos dispositivos. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) En total se instalarán 27 dispositivos cuyo presupuesto de proyecto es de 13.483 €. Hay que dejar constancia de que su funcionamiento se basa simplemente en un efecto óptico, y no requiere aporte alguno de energía.

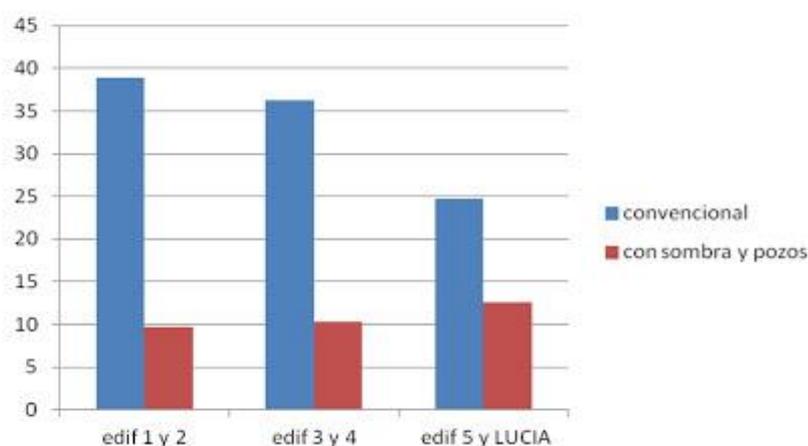
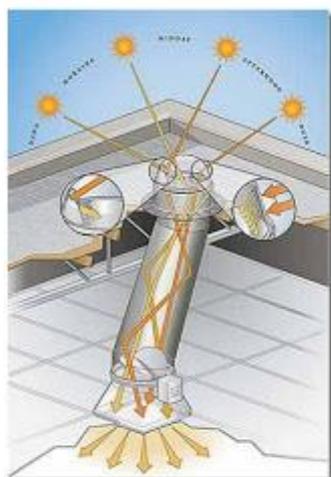


Figura I.19 Pozo de luz y reducción de demanda energética entre un edificio de referencia y el Edificio lucia

## Recuperación de agua

La gestión del agua ha sido exhaustivamente estudiada. Se ha seguido una premisa fundamental: recuperar todo el agua que se utilice en el edificio. Evidentemente no todo el agua puede recuperarse, más aún en un edificio de laboratorios. En primer lugar se recupera el 100% del agua de lluvia recogida en la cubierta, la cual posee un 75% de cubierta vegetal que hará un primer filtrado natural a este agua. En segundo lugar tenemos las aguas grises, las que tras un proceso de reciclado se usarán para el sistema de saneamiento aprovechando de este modo también el 100% de las aguas grises. Hasta aquí tenemos las fuentes de agua del edificio que se pueden aprovechar.

Por otro lado se tienen las aguas procedentes de laboratorio. Este agua tendrá restos de los productos utilizados en los laboratorios, los cuales si se vertieran directamente a la red podrían dañar el medio ambiente. Por esta razón las aguas procedentes de laboratorios serán previamente tratadas antes de su vertido a la red.

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

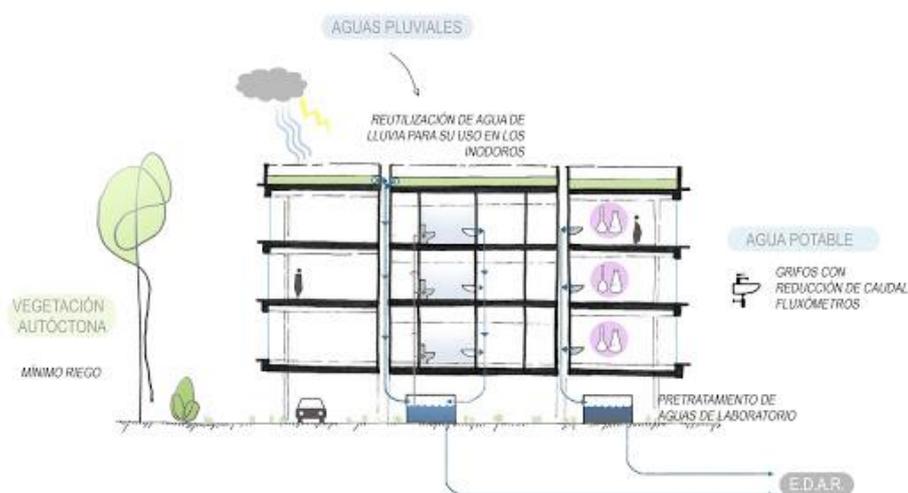


Figura I.20 Esquema de gestión del agua

### Gestión de residuos

Se ha tenido en cuenta la gestión de los residuos tanto para la fase de obra como en la fase de uso del edificio, incluyendo en el proyecto un plan de estudio de todos los residuos generados durante la vida útil del edificio. También se prevé la creación de compost desde los residuos vegetales. Y por último se han estudiado los residuos en la fase de demolición pensando en la máxima recuperación de los materiales.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura I.21 Fase 1: Construcción

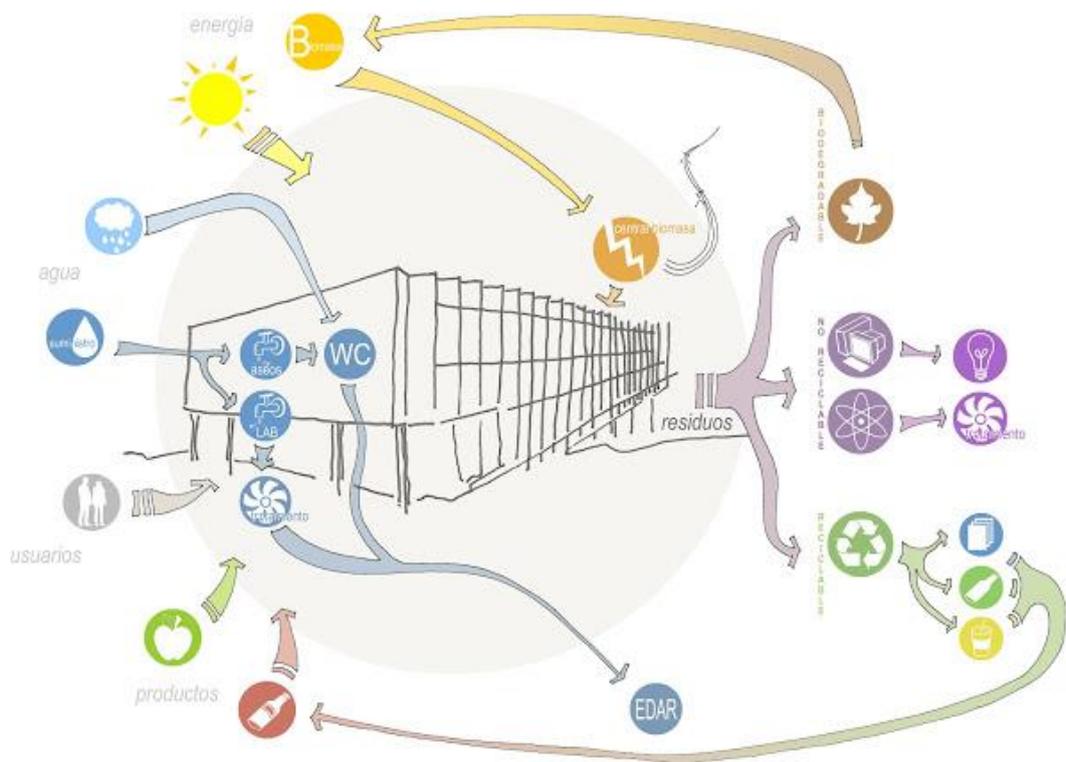


Figura I.22 Fase 2: Utilización

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura I.23 Fase 3: Demolición

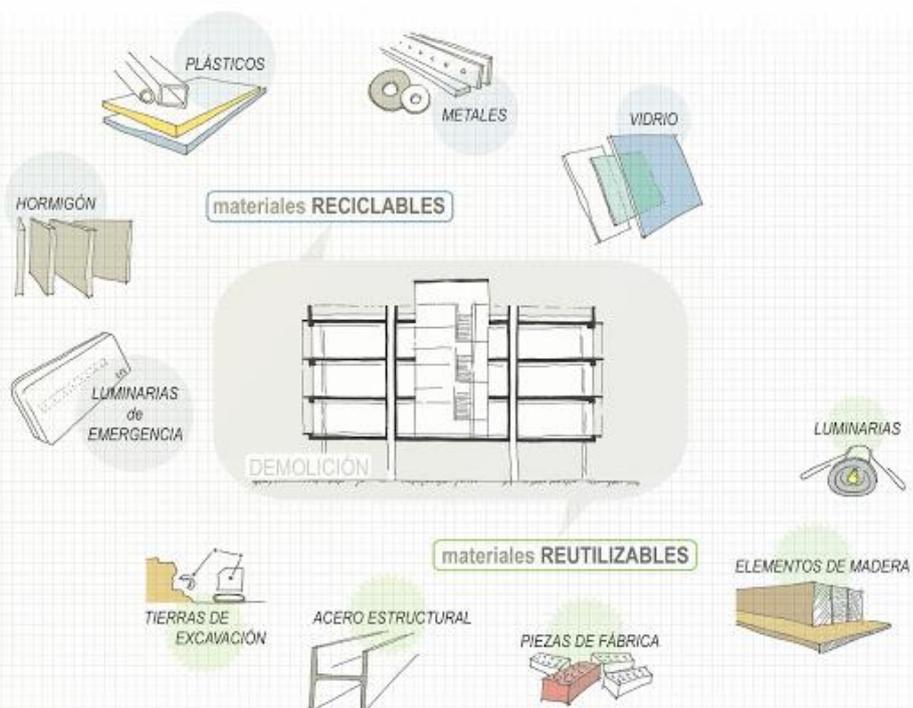


Figura I.24 Materiales reutilizables y reciclables

## 2.4. Premios y certificaciones

---

Este apartado busca enfatizar la relevancia que el Edificio Lucía ha obtenido. Esta relevancia se denota en los múltiples premios que el edificio ha recibido. También se incluirán en este apartado todas las edificaciones que posee el edificio. Se comenzará por los premios que ha ganado el Edificio Lucía.

### Premios

---

Los premios son de diversa índole: construcción, sostenibilidad, cultura... Todos ponen en valor el trabajo desarrollado y el valor del edificio.

#### *GREEN BUILDING SOLUTIONS AWARDS 2015*

Los Green Building Solutions Awards, son entregados por Construction21. Construction21 es una plataforma de colaboración dedicada a todos los profesionales que trabajan en el sector de la construcción sostenible [W6].

El Edificio Lucía consiguió ganar el premio en la categoría Net Zero Energy Buildings<sup>9</sup> [W7].

#### *Premios EnerAgen 2015*

Por otra parte, en el mes de marzo de 2015 el edificio LUCIA consiguió uno de los premios que EnerAgen (Asociación de Agencias Españolas de Gestión de la Energía) entrega a las mejores actuaciones en pro de la sostenibilidad energética a través de las energías renovables y la eficiencia energética en todo el territorio nacional. La entrega de premios coincidió con la XIV Asamblea General de la Asociación y se celebró en Huelva. El edificio LUCIA recibió el premio en la categoría de Edificación y el jurado valoró la calidad del proyecto presentado por la Universidad de Valladolid al tratarse de un edificio ejemplar de consumo energético casi nulo y cero emisiones de CO<sub>2</sub> [W8].

#### *Premios Construcción Sostenible*

Los Premios de Construcción Sostenible de Castilla y León son una iniciativa de la Consejería de Fomento y de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León en colaboración con el Instituto de la Construcción de Castilla y León.

Se trata de un evento de carácter bienal, enmarcado en la estrategia de impulso y promoción de una mejora de la calidad de vida de nuestro entorno urbano y medioambiental.

---

<sup>9</sup> Net Zero Energy Buildings: Edificio de energía nula

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

El edificio Lucía también fue galardonado con el primer puesto en los premios construcción sostenible en la categoría equipamiento [W9].

### *MEA 2013*

El Edificio Lucía fue galardonado con el tercer premio en la categoría cultura por la Mediterranean Sustainable Architecture [W10].

### *premio VEKA*

Durante la celebración del 5º Congreso Europeo en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo , celebrado en el Palacio de Miramar Jauregia en San Sebastián, el Congreso EESAP otorgó el premio VEKA de comunicación al Proyecto LUCIA, edificio de la Universidad de Valladolid [W11].

## **Certificaciones**

---

Aparte de los premios recibidos, el edificio Lucía cuenta con varias certificaciones como son LEED y VERDE.

### *LEED*

El Green Building Council España es una asociación sin ánimo de lucro que reúne a representantes de todos los agentes del sector de la edificación con el fin de contribuir a la transformación del mercado hacia una edificación más sostenible. Para ello, cuenta con varias certificaciones como lo son LEED o VERDE.

LEED cuyas siglas en inglés representan: Líder en Eficiencia Energética y Diseño sostenible, es un sistema de evaluación y estándar internacional desarrollado por el U.S. Green Building Council para fomentar el desarrollo de edificaciones basadas en criterios sostenibles y de alta eficiencia.

LEED se caracteriza por proporcionar una evaluación de la sostenibilidad de la edificación valorando su impacto en siete áreas principales:

1. Emplazamiento sostenible
2. Eficiencia del uso del agua
3. Eficiencia energética, energías renovables y emisiones a la atmósfera
4. Materiales y recursos naturales
5. Calidad del ambiente interior
6. Innovación en el diseño
7. Prioridad regional [W12]

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Según la certificación LEED, el Edificio Lucía es el edificio más sostenible de Europa y el segundo del mundo, solo por detrás de la Torre Pixel en Australia (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) [W02]. La calificación obtenida acorde con esta certificación es de 98 puntos (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) [6], obteniendo el certificado LEED platinum, el más alto posible.



Puntuación: 98 puntos

Figura I.25 Calificación LEED [W13]



Figura I.26 Edificio Pixel [W13]

### *VERDE*

Como se ha dicho antes, el Green Building Council España también posee otras herramientas de certificación como lo son las herramientas VERDE.

Las herramientas VERDE tienen como objetivo dotar de una metodología de evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Las distintas herramientas de

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

las que se dispone pretenden cubrir todas las necesidades del sector de la edificación en España.

Todas las herramientas VERDE son accesibles al público a través de la página web [www.gbce.es](http://www.gbce.es) donde se encuentran las herramientas y también pueden descargarse los manuales que describen cada uno de los criterios a evaluar y su metodología de cálculo. De este modo, cualquier técnico puede apoyarse en estas herramientas a la hora de abordar un proyecto edificatorio sin necesidad de acreditarse como evaluador VERDE [W14].

En este sentido la calificación obtenida por el edificio Lucia es de 4.51 puntos [W4].



Figura I.27 calificación VERDE [W4]

### *Certificación energética*

La Certificación Energética de los Edificios es una exigencia derivada de la Directiva 2002/91/CE, en lo referente a la certificación energética, esta Directiva y la Directiva 2010/31/UE, de 19 de mayo, relativa a la eficiencia energética de los edificios, se transpone parcialmente al ordenamiento jurídico español a través del Real Decreto 235/2013 de 5 de abril, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios, tanto de nueva construcción, como existentes [W15].

Este Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, publicado en el Boletín Oficial del Estado nº 89 del 13 de abril de 2013, entro en vigor al día siguiente de su publicación [7].

El edificio Lucía se encuentra certificado energéticamente. Su calificación en este respecto es A, la máxima posible.



Figura I.28 Certificación energética [W4]

---

## 3. ESTADO DEL ARTE

---

El trabajo desarrollado en el edificio Lucía se centrará en la doble piel. Esta se trata de una fachada ventilada con presencia de paneles fotovoltaicos. Si bien una solución de fachada ventilada fotovoltaica es innovadora en sí, la mejora correspondiente a la cuantificación de los ahorros en calefacción al introducir aire al interior del edificio lo es aún más. Por tanto, conviene saber cuáles son los avances desarrollados hasta ahora y ver el punto de investigación en el que se sitúan las soluciones comentadas.

### 3.1. Estado del arte de los paneles fotovoltaicos

---

En primer lugar se hablará del estado del arte de los paneles fotovoltaicos, comenzando por su desarrollo histórico hasta llegar al momento actual.

#### Desarrollo histórico

---

No se puede hablar de paneles fotovoltaicos sin hablar previamente del descubrimiento de su principio de funcionamiento el efecto fotoeléctrico.

##### *Efecto fotoeléctrico*

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material al incidir sobre él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general) [8].

El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz, en 1887, al observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta que cuando se deja en la oscuridad. La explicación teórica fue hecha por Albert Einstein, quien publicó en 1905 el revolucionario artículo “Heurística de la generación y conversión de la luz”, basando su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck. Más tarde Robert Andrews Millikan pasó diez años experimentando para demostrar que la teoría de Einstein no era correcta, para finalmente concluir que sí lo era. Eso permitió que Einstein y Millikan fueran galardonados con Premios Nobel en 1921 y 1923, respectivamente [W16].

##### *Origen de las celdas fotovoltaicas solares*

La era moderna de la tecnología de potencia solar no llegó hasta el año 1954 cuando los Laboratorios Bell, descubrieron, de manera accidental, que los

semiconductores de silicio dopado con ciertas impurezas, eran muy sensibles a la luz.

Su desarrollo fue ligado a la industria aeroespacial, y estos avances contribuyeron a la fabricación de la primera célula solar comercial con una conversión de la energía solar de, aproximadamente, el 6 %. La URSS lanzó su primer satélite espacial en el año 1957, y los EEUU un año después. En el diseño de este se usaron células solares creadas por Peter Iles en un esfuerzo encabezado por la compañía Hoffman Electronics [W17].

### *Situación actual*

Hoy en día, las celdas fotovoltaicas se han convertido en el medio más fiable de suministrar energía eléctrica a un satélite o a una sonda en las órbitas interiores del Sistema Solar. Esto es gracias a la mayor irradiación solar sin el impedimento de la atmósfera y a su bajo peso.

En tierra, son la fuente solar más popular en instalaciones pequeñas o en edificios, frente al método de campos de espejos heliostatos empleados en las grandes centrales solares.

Junto con una pila auxiliar, se usa habitualmente en ciertas aplicaciones de poco consumo como boyas o aparatos en territorios remotos, o simplemente cuando la conexión a una central de energía sea impracticable. Su utilización a gran escala se ve restringida por su alto coste, tanto de compra como de instalación. Hasta ahora, los paneles fotovoltaicos ocupan una pequeña porción de la producción mundial de energía.

Experimentalmente han sido usados para dar energía a automóviles, por ejemplo en el World solar challenge a través de Australia. Muchos yates y vehículos terrestres los usan para cargar sus baterías lejos de la red eléctrica. Programas de incentivo a gran escala, ofreciendo recompensas financieras como la posibilidad de vender el exceso de electricidad a la red pública, han acelerado en gran medida el avance de las instalaciones de celdas fotovoltaicas solares en España, Alemania, Japón, Estados Unidos y otros países.

La experiencia en producción e instalación, los avances tecnológicos que aumentan la eficiencia de las celdas solares, las economías de escala en un mercado que crece un 40% anualmente, unido a las subidas en los precios de los combustibles fósiles, hacen que las se empiece a contemplar la fotovoltaica para producción eléctrica de base, en centrales conectadas a red [W18].

### *Tipos de conexiones*

Existen fundamentalmente dos tipos de aplicaciones de la energía solar fotovoltaica dependiendo de cómo estén conectadas a la red: instalaciones aisladas de la red eléctrica y centrales de generación conectadas a la red.

Los sistemas aislados de energía solar fotovoltaica tienen como función disponer de electricidad en lugares alejados de la red de distribución eléctrica. De esta manera, se puede suministrar electricidad a casas de campo, refugios de montaña, bombeos de agua, instalaciones ganaderas, sistemas de iluminación o balizamiento, sistemas de comunicaciones, etc. Estos sistemas se componen principalmente de captación de energía solar mediante paneles solares fotovoltaicos y almacenamiento de la energía eléctrica generada por los paneles en baterías.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a red tienen como función generar electricidad mediante paneles solares fotovoltaicos e inyectarla directamente a la red de distribución eléctrica. Este tipo de centrales fotovoltaicas pueden variar en tamaño desde pequeñas instalaciones de 1 a 5 kWp en una terraza o tejado residencial, a instalaciones de hasta 100 kWp sobre cubiertas de naves industriales o en suelo, e incluso plantas de varios megavatios.

El modelo más desarrollado en España es el conocido como huerta solar, que consiste en la agrupación de varias instalaciones de distintos propietarios en suelo rústico. Cada instalación tiene una potencia de hasta 100kW que es el umbral que establecía la legislación para el máximo precio de venta de energía eléctrica. Estas instalaciones pueden ser fijas o con seguimiento, de manera que los paneles fotovoltaicos están instalados sobre unas estructuras que se mueven siguiendo el recorrido del sol para maximizar la generación de electricidad. La demanda de este tipo de instalaciones ha sido tal que en los últimos años se han saturado las líneas eléctricas de muchas zonas rurales, a la vez que se ha aumentado el precio de parcelas rústicas y se han disparado las solicitudes de punto de conexión [W19].

### *Ventajas actuales de la energía solar*

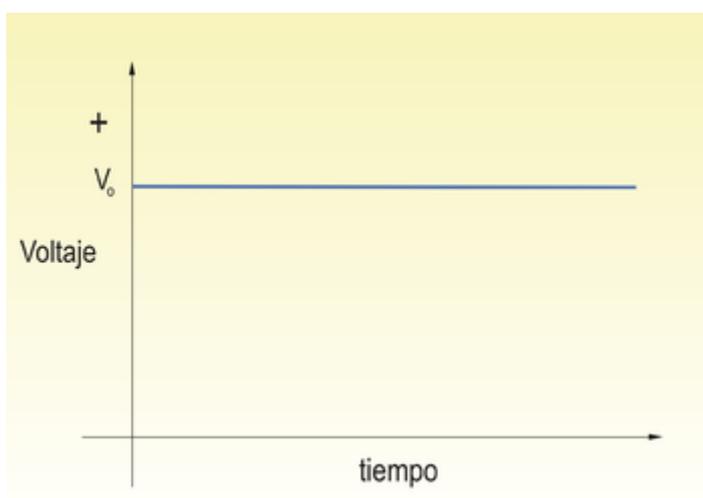
Por último, cabe recalcar las ventajas de la energía solar. La energía solar presenta una amplia disponibilidad además de ser una energía limpia debido a que no emite emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Como otros factores a su favor sus costes de mantenimiento son bajos y es una manera de producir energía que no genera ruido.

### *Principio de funcionamiento*

Algunos de los fotones, que provienen de la radiación solar, impactan sobre la primera superficie del panel, penetrando en este y siendo absorbidos por materiales semiconductores, tales como el silicio o el arseniuro de galio.

Los electrones, subpartículas atómicas que forman parte del exterior de los átomos, y que se alojan en orbitales de energía cuantizada, son golpeados por los fotones (interaccionan) liberándose de los átomos a los que estaban originalmente confinados.

Esto les permite, posteriormente, circular a través del material y producir electricidad. Las cargas positivas complementarias que se crean en los átomos que pierden los electrones, (parecidas a burbujas de carga positiva) se denominan huecos y fluyen en el sentido opuesto al de los electrones, en el panel solar.



**Figura I.29** Representación de la diferencia de potencial, o voltaje de corriente con respecto al tiempo en corriente continua

Un conjunto de paneles solares transforman la energía solar (energía en forma de radiación y que depende de la frecuencia de los fotones) en una determinada cantidad de corriente continua, también denominada DC (acrónimo del inglés Direct Current y que corresponde a un tipo de corriente eléctrica que se describe como un movimiento de cargas en una dirección y un sólo sentido, a través de un circuito. Los electrones se mueven de los potenciales más bajos a los más altos) [W17].

### *Tipos de células fotovoltaicas*

Existen diferentes tipos de paneles fotovoltaicos en función del material del que están fabricados: arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio y silicio [9].

Dentro de los paneles de silicio existe una segunda clasificación. Estos paneles se clasifican en función tipo de célula que los forman. Dentro de esta clasificación se pueden distinguir células cristalinas y amorfas.

#### *Cristalinas*

Las células fotovoltaicas formadas por silicio cristalizado se denominan cristalinas. Dentro de éstas se constituyen 2 tipos:

- **Monocristalinas:** se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si). Sus características más importantes se enumeran a continuación.
  - Presentan rendimientos de hasta el 15%
  - Son sencillas de producir
  - Presentan gran modularidad (formas variadas)
  - Buen comportamiento con radiación difusa
- **Policristalinas:** son aquellas que se encuentran formadas por pequeñas partículas cristalizadas. Sus características más importantes se enumeran a continuación.
  - Rendimiento de hasta el 30%
  - Procesos de elevado control en su fabricación
  - Caras
  - Longevas

#### *Amorfas:*

Son aquellas obtenidas sin que el silicio halla cristalizado. Sus características más importantes se enumeran a continuación:

- Bajo rendimiento (6%)
- Muy sencillas de producir
- Muy económicas
- Ideales para pequeños objetos electrónicos [10]

### *Composición de los paneles fotovoltaicos monocristalinos*

Debido a que la empresa fabricante de los paneles que se encuentran en el edificio Lucía quebró, no se puede conocer con exactitud las características de los paneles.

Para solucionar este problema se ha recurrido a consultar opciones utilizadas en la industria, como podrían las de VMZ [11]. El panel propuesto está

fabricado en silicio y formado por células monocristalinas. Por ello será en los que nos centremos en la siguiente descripción.

Los paneles fotovoltaicos monocristalinos poseen una composición más o menos estándar, en donde los componentes que siempre están presentes son :

- Vidrio templado, cuya función es proteger a los materiales del interior de la celda y además de servir de filtro de radiación, dejando fuera por ejemplo a gran parte de la radiación UV. Es un vidrio templado con una baja reflectividad lo que permite absorber la luz a diferencia de otros vidrios utilizados en vivienda.
- EVA o etileno vinilo acetato es un polímero termoplástico, que se usa en los módulos fotovoltaicos como encapsulante de las células generadoras. Éstas se conectan entre sí conformando el núcleo fotovoltaico del panel. Se depositan en un soporte cristalino y se encapsulan mediante EVA, para evitar la entrada de aire o humedad.
- Celda de Silicio, responsable directa de la conversión de energía lumínica en energía eléctrica gracias a sus propiedades de semiconductor.
- Tedlar o fluoruro de polivinilo (PVF) , para la parte inferior del panel formada por láminas de Tedlar-Poliéster-Tedlar o Tedlar-Poliéster-EVA. El fin de estas láminas es proteger a las células fotovoltaicas de los efectos degradantes de la radiación ultravioleta y, sirve como aislante eléctrico.

El conjunto es sellado, de modo que, por los laterales no pueda entrar ni humedad ni aire y, se le monta un marco de aluminio para protegerlo y facilitar su manipulación.

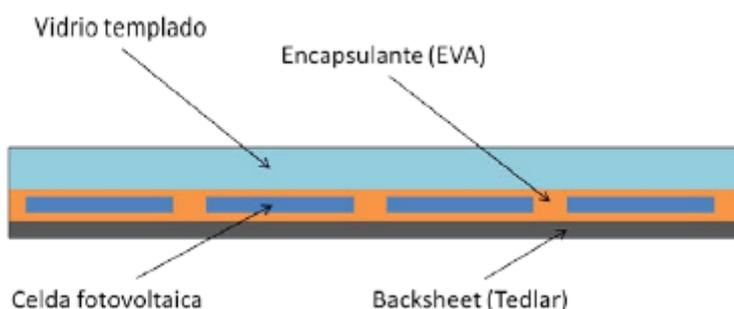


Figura I.30 Composición de paneles fotovoltaicos monocristalinos de silicio [9]

## Últimos avances

---

los últimos avances han ido dirigidos en la correcta caracterización de la potencia de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura y de la transmisión de calor que se da en los mismos.

### *Potencia en función de la temperatura*

Estudios confirman que para los mismos niveles de irradiación la potencia y por tanto la eficiencia se reduce al aumentar la temperatura. La eficiencia depende fuertemente de la temperatura del módulo fotovoltaico y un sobrecalentamiento provoca una disminución de la energía producida.

Se han estudiado la influencia de las condiciones ambientales en el rendimiento del panel fotovoltaico, es decir, en las características del panel (potencia, corriente y tensión). Estos estudios se realizaron utilizando valores dados por el fabricante para comparar los valores simulados con los experimentales.

A partir de los análisis experimentales y de simulación, se concluye que: La temperatura del panel y la potencia se relacionan con la irradiancia y otros factores externos. El panel no genera la misma cantidad de energía a lo largo del tiempo, y su temperatura tiende a estabilizarse con el tiempo. La variación de la temperatura provoca por lo tanto una variación de la eficiencia del panel fotovoltaico. La potencia del panel varía en ambientes exteriores (es decir, dependiendo de la ubicación) de la clasificación de potencia citada por el fabricante (que se mide en el laboratorio bajo condiciones estandar). Es importante tener en cuenta que los datos de campo, es decir, la clasificación de paneles fotovoltaicos en la ubicación de instalación, se utilizan al diseñar y dimensionar sistemas de energía fotovoltaica [12].

### *Transmisión de calor en los paneles fotovoltaicos.*

Existen estudio que buscan caracterizar el comportamiento térmico dependiente del tiempo de los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino (PV) con varias configuraciones: vidrio-vidrio (GG) y hoja-vidrio (GB). Se creó un modelo de transferencia de calor para módulos fotovoltaicos en el entorno COMSOL Multiphysics, para ilustrar el comportamiento térmico dependiente del tiempo del módulo implementado durante el funcionamiento.

El conocimiento de las fuentes de calor, la distribución de la temperatura, así como el rendimiento de la dispersión de calor y la temperatura uniforme por el módulo solar en funcionamiento se presentó con mapas, gráficos y diferencias de temperatura entre diferentes lugares dentro del módulo fotovoltaico.

Todo el análisis que conduce a las conclusiones de que los módulos GG tiene una mejor temperatura uniforme y el rendimiento de dispersión de calor con respecto al módulo GB, aunque el módulo GG se compromete a una temperatura ligeramente superior. Sin embargo, la temperatura del módulo GG también puede reducirse eligiendo las cubiertas adecuadas de encapsulado y protector [13].

## 3.2. Estado del arte de las fachadas ventiladas

---

A continuación se hablará del estado del arte de las fachadas ventiladas, comenzando por su definición hasta llegar al momento actual y los proyectos de investigación asociados.

### Definición

---

La fachada ventilada es un sistema constructivo de cerramiento exterior constituido por una hoja interior, una capa aislante, y una hoja exterior no estanca. Este tipo de fachada por lo general permite acabados duraderos y de gran calidad, y ofrece buenas prestaciones térmicas, aunque tiene un precio elevado. Es una solución habitual en edificios institucionales y representativos [W20].

### Funcionamiento

---

La existencia de juntas entre las piezas de fachada evita los problemas típicos de la dilatación, por lo que son fachadas que presentan un buen aspecto durante mucho tiempo. La hoja exterior también amortigua los cambios de temperatura tanto en el aislante térmico como en el impermeabilizante, prolongando su vida útil. Por último, la existencia de la hoja exterior ayuda a reducir las pérdidas térmicas del edificio: en los meses de verano la piel exterior se calienta creando un efecto convectivo que hace circular el aire en el interior de la cámara. Este “efecto chimenea” desaloja el aire caliente y lo renueva con aire más frío. En los meses de invierno el aire en la cámara se calienta, pero no lo suficiente como para crear el mismo efecto y se conserva mejor el calor. Otra ventaja es que sus labores de mantenimiento son mínimas. Se autolimpia con el agua de lluvia [W20].

### Últimos avances

---

La Unión Europea considera que esta solución constructiva es más eficiente que otras existentes actualmente, de modo que busca fomentar proyectos que desarrollen este tipo de soluciones.

Actualmente varios proyectos europeos de investigación se centran en estas soluciones, fomentándolas para maximizar los ahorros que se producen mediante las mismas. Los programas en los que desarrollan estas soluciones son variados, entre los que se pueden encontrar el séptimo programa marco (FP7<sup>10</sup>), Energía Inteligente en Europa (IEE<sup>11</sup>) o el más reciente, el Horizonte

---

<sup>10</sup> FP7: Framework Program 7

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

2020 (H2020<sup>12</sup>). Entre estos proyectos se encuentran BRICKER, CommONEnergy, COMMONCENSE y REPLICATE.

Cada uno de estos proyectos desarrollan soluciones de fachada ventilada, si bien el enfoque es diferente en cada uno de ellos. Esto se puede ver en la tabla inferior:

Tabla I.16 Proyectos europeos con soluciones de fachada ventilada

Proyecto	Programa	Enfoque
BRICKER [W21]	FP7	Estrategias de renovación de edificios públicos
CommONEnergy [W22]	FP7	Preconcepción de los centros comerciales del consumismo a la conservación energética
COMMONCENSE [W23]	IEE	Monitorización del confort para el estándar CEN <sup>13</sup> EN15251 relacionado con el EPDB <sup>14</sup>
REPLICATE [W24]	H2020	Renacimiento de lugares con tecnologías y ciudadanos innovadores

Demostrando así que pese a las diferentes tipologías de edificio a la que se refieren los proyectos las fachadas ventiladas se pueden desarrollar en múltiples escenarios.

---

<sup>11</sup> IEE : Intelligent Energy Europe

<sup>12</sup> H2020: Horizon 2020

<sup>13</sup> CEN: European Committee for Standardization. Comité europeo para la estandarización

<sup>14</sup> EPDB: Energy Performance of Buildings Directive. Directiva de rendimientos energéticos en edificios

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

### Fuentes bibliográficas

---

- [1] “Informe de la secretaría general a los ministros”. OCDE. 2016.
- [2] “Perspectivas de la energía en el mundo” (en inglés, World Energy Outlook, WEO-2016). IAE. 2016.
- [3] “Memoria Anual IDAE 2014”. IDAE. 2014.
- [4] Jorge, J. TFG. “Caracterización de sistemas de acumulación energética y enfriamiento evaporativo como sistemas de reducción de consumos de energía en los edificios”. Universidad de Valladolid. Valladolid, 2016.
- [5] “Análisis energético de doble piel fotovoltaica. Edificio Lucía”. Equip Arquitectura Pich-Aguilera. 2012.
- [6] “Listado puntos LEED del Lucía”. Green Building Council. 2012.
- [7] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Núm. 89. Sábado 13 de abril de 2013.
- [8] Delgado, J. “FISICANOVA: Una Aproximación a la Realidad”. Editorial FISICANOVA. ISBN 978-958-44-4781-4. Colombia, 2008.
- [9] Maggi, S.A. TFC. “Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile”. Universidad de Chile. Santiago de Chile, 2013.
- [10] García, P. TFC. “Estudio e instalación de una placa fotovoltaica policristalina con refrigeración posterior y bajo carga variable con módulo termoeléctrico, para el desarrollo de prácticas de laboratorio”. Universidad de Valladolid, Valladolid. 2002
- [11] "Sistema de fachada ventilada compuesto por paneles de zinc provistos de módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino". VMZ. 2017
- [12] F. Zaoui, A. Titaouine, M. Becherif, M.Emziane, A. Aboubou. “A combined experimental and simulation study on the effects of irradiance and temperature on photovoltaic modules”. Science Direct. 2015. Pp 373-380.
- [13] Dua Y., Taob W., Liub Y., Jiangb J., Huangb H. “Heat transfer modeling and temperature experiments of crystalline silicon photovoltaic modules”. Science Direct. Abril 2017. Pp 257-263.

## Referencias en páginas web

---

- [W1] International energy agency. Escenarios energéticos. <https://www.iea.org/publications/scenariosandprojections/>. Última consulta 20/03/2017.
- [W2] International energy agency. World Energy Outlook 2016 - Executive Summary. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-outlook-2016--executive-summary--spanish-version.html>. Última consulta 20/03/2017.
- [W3] OCDE. Acerca de la OCDE. <http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/>. Última consulta 20/03/2017.
- [W4] Edificio Lucía. Características del edificio Lucía. <http://edificio-lucia.blogspot.com.es/>. Última consulta 27/03/2017.
- [W5] European commission. Support for sustainable energy solutions. <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/>. Última consulta 27/03/2017.
- [W6] Construction 21 España. Consulta de premios. <http://www.construction21.org/espana/static/quienes-somos.html>. Última consulta 27/03/2017.
- [W7] Construction 21 España. Green building solutions awards winners 2015. <http://www.construction21.org/static/award-2015-winners.html>. Última consulta 27/03/2017.
- [W8] UVA. Comunicación sobre el edificio Lucía. <http://comunicacion.uva.es/export/sites/comunicacion/1729c61f-ee77-11e4-a528-d59857eb090a/>. Última consulta 27/03/2017.
- [W9] Premios construcción sostenible. 6ª edición de los premios construcción sostenible de Castilla y León. <http://www.premioconstruccionsostenible.es/index.php>. Última consulta 27/03/2017.
- [W10] Eurasian mediterranean región. The architectural culture of the eurasian mediterranean región. <http://mea2013.gr/the-architectural-culture-of-the-eurasian-mediterranean-region/>. Última consulta 27/03/2017.
- [W11] Calor y frío. El Congreso EESAP otorga el premio VEKA al Proyecto LUCIA. <https://www.caloryfrio.com/congresos/congresos-eficiencia-energetica/congreso-eesap-premio-veka-proyecto-lucia-edificio-universidad-valladolid.html>. Última consulta 27/03/2017.
- [W12] Green Building Council España. Herramienta LEED 2014. <http://www.gbce.es/pagina/certificacion-leed>. Última consulta 27/03/2017.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

- [W13] Jets. Pixel building. <http://standard.jetsgroup.com/en/Sanitary-systems/Buildings/References/Pixel-building.aspx>. Última consulta 27/03/2017.
- [W14] Green Building Council España. Certificación VERDE. <http://www.gbce.es/pagina/certificacion-verde>. Última consulta 27/03/2017.
- [W15] IDAE. Calificación energética de edificios. [http://www.idae.es/index.php/id.25/relmenu.346/mod.pags/mem.de\\_talle](http://www.idae.es/index.php/id.25/relmenu.346/mod.pags/mem.de_talle). Última consulta 27/03/2017.
- [W16] Wikipedia. Efecto fotoeléctrico. [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_fotoel%C3%A9ctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_fotoel%C3%A9ctrico). Última consulta 17/03/2017.
- [W17] Wikipedia. Panel fotovoltaico. [https://es.wikipedia.org/wiki/Panel\\_fotovoltaico#Historia](https://es.wikipedia.org/wiki/Panel_fotovoltaico#Historia). Última consulta 17/03/2017.
- [W18] Paneles fotovoltaicos. Qué es y cómo funciona un panel fotovoltaico. <http://paneles-fotovoltaicos.blogspot.com/>. Última consulta 17/03/2017.
- [W19] Energiza. Efecto fotoeléctrico e instalaciones fotovoltaicas. <http://www.energiza.org/solar-fotovoltaica/22-solar-fotovoltaica/625-efecto-fotoelectrico-e-instalaciones-fotovoltaicas>. Última consulta 17/03/2017.
- [W20] Wikipedia. Fachada ventilada. [https://es.wikipedia.org/wiki/Fachada\\_ventilada](https://es.wikipedia.org/wiki/Fachada_ventilada). Última consulta 17/03/2017.
- [W21] BRICKER. Total Renovation Strategies for Energy Reduction in Public Building Stock. Web 1: [http://cordis.europa.eu/project/rcn/109253\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/109253_en.html). Web 2: <http://www.bricker-project.com/>. Última consulta 17/03/2017.
- [W22] CommONEnergy. Re-conceptualize shopping malls from consumerism to energy conservation. Web 1: [http://cordis.europa.eu/project/rcn/109515\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/109515_en.html). Web 2: <http://www.commonenergyproject.eu/>. Última consulta 17/03/2017.
- [W23] COMMONCENSE. Comfort monitoring for CEN Standard EN15251 linked to EPBD. Web 1: <http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/commoncense>. Web 2: <http://www.commoncense.info/>. Última consulta 17/03/2017.
- [W24] REPLICATE. REnaissance of Places with Innovative Citizenship and Technology. [http://cordis.europa.eu/project/rcn/200256\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/200256_en.html). Última consulta 17/03/2017.

---

## TABLAS

---

Tabla I.1 Escenarios en función de las políticas de los países.....	28
Tabla I.2 Escenarios en función del calentamiento global [W1] .....	28
Tabla I.3 Subvenciones al consumo de combustibles fósiles .....	29
Tabla I.4 Proporción de carbón en el mix energético .....	30
Tabla I.5 Aumento de demanda eléctrica .....	30
Tabla I.6 Disminución de costes de las energías renovables.....	33
Tabla I.7 Reducción de subvenciones a las energías renovables.....	33
Tabla I.8 Intensidad media de emisiones de la generación eléctrica.....	33
Tabla I.9 Personas sin acceso a fuentes de energía modernas.....	34
Tabla I.10 Coches eléctricos en el mundo .....	35
Tabla I.11 Coeficientes de transmisión térmica empleados en el edificio LUCIA en comparación con los exigibles según CTE y ASHRAE.....	47
Tabla I.12 Cálculo del cerramiento .....	47
Tabla I.13 Cálculo de la cubierta ajardinada .....	47
Tabla I.14 Comparativa de los sistemas de iluminación, de un edificio normal y el edificio LUCIA .....	48
Tabla I.15 Balance de costes y ahorros de las energía limpias incorporadas al edificio.....	52
Tabla I.16 Proyectos europeos con soluciones de fachada ventilada .....	73

---

## FIGURAS

---

Figura I.1 Evolución del consumo de energía final por fuentes, 2000-2014 .	37
Figura I.2 Estructura sectorial de la demanda de energía final, 2000-2013 .	38
Figura I.3 Evolución del consumo de energía primaria de renovables según tecnologías, 2000-2014 .....	39
Figura I.4 Estructura de Estructura de generación eléctrica según tecnologías, 2014.....	39
Figura I.5 Distribución de la capacidad de producción de energía con fuentes renovables, 2014 .....	40
Figura I.6 Localización del Edificio Lucía .....	42
Figura I.7 Edificio Lucía .....	43
Figura I.8 Diseño Bioclimático .....	45
Figura I.9 Planta tipo. (Efecto dentado en el diseño de huecos para reorientar los huecos en fachadas Norte-Este y Sur-Oeste.) .....	46
Figura I.10 Sección axonométrica. Pozos de luz, aparcamiento abierto y central de biomasa.....	49
Figura I.11 Fuentes energéticas.....	50
Figura I.12 Fuentes energéticas.....	51
Figura I.13 Ventajas de los paneles fotovoltaicos. ....	52
Figura I.14 Esquemas de ventilación: verano e invierno.....	53
Figura I.15 Pozos canadienses en construcción .....	54
Figura I.16 Diente de sierra y parasoles para producir efecto de auto sombra .....	54
Figura I.17 Reducción de la demanda de refrigeración en kWh/m2año con el efecto de autosombreamiento entre los diversos edificios de referencia y LUCIA .....	55
Figura I.18 Resumen comparativo de iluminación directa entre diversos edificios de referencia y LUCIA .....	56
Figura I.19 Pozo de luz y reducción de demanda energética entre un edificio de referencia y el Edificio lucia .....	57
Figura I.20 Esquema de gestión del agua .....	58
Figura I.21 Fase 1: Construcción .....	59
Figura I.22 Fase 2: Utilización .....	59
Figura I.23 Fase 3: Demolición.....	60
Figura I.24 Materiales reutilizables y reciclables .....	60
Figura I.25 Calificación LEED [W13] .....	63
Figura I.26 Edificio Pixel [W13].....	63
Figura I.27 calificación VERDE [W4] .....	64
Figura I.28 Certificación energética [W4] .....	64

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Figura I.29 Representación de la diferencia de potencial, o voltaje de corriente con respecto al tiempo en corriente continua .....	68
Figura I.30 Composición de paneles fotovoltaicos monocristalinos de silicio [9] .....	70

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

---

# CAPÍTULO II: ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LA DOBLE PIEL

---

## ÍNDICE CAPÍTULO II

<b>1. OBJETIVOS DE LA MEDIDA.....</b>	<b>83</b>
<b>2. EQUIPOS DE MEDIDA.....</b>	<b>84</b>
2.1. SONDAS DE TEMPERATURA .....	84
2.2. TESTO COMSOFT BÁSICO.....	86
2.3. PIRANÓMETRO.....	87
2.4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL PIRANÓMETRO .....	88
2.5. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL EDIFICIO LUCÍA .....	89
2.6. TERMOCÁMARA.....	92
2.7. MEDIDOR DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL.....	93
2.8. CÁMARA TÉRMICA .....	95
2.9. HORNO DE CALIBRACIÓN .....	96
<b>3. CALIBRACIÓN DE SONDAS.....</b>	<b>98</b>
3.1. CALIBRACIÓN EN HORNO .....	98
3.2. CALIBRACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE .....	101
3.3. CALIBRACIÓN A ALTA TEMPERATURA .....	103
3.4. CALIBRACIÓN A BAJA TEMPERATURA .....	106
3.5. CURVAS DE CORRECCIÓN.....	113
<b>4. DESARROLLO DE EXPERIMENTOS EN EL EDIFICIO LUCÍA .....</b>	<b>116</b>
4.1. MEDIDAS DE TEMPERATURA .....	116
4.2. MEDIDAS DE RADIACIÓN.....	126
MEDIDAS DE ABSORTIVIDAD .....	137
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>140</b>
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	140
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB .....	140

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

TABLAS..... 142

FIGURAS..... 143

---

## 1. OBJETIVOS DE LA MEDIDA

---

El objeto del presente trabajo de fin de grado es evaluar las posibles Medidas de Ahorro Energético (MAEs) que se pueden llevar a cabo en el Edificio Lucía. Para poder evaluar los ahorros de la manera más fiel posible se llevarán a cabo diferentes medidas experimentales que tienen como fin último describir el comportamiento de la doble piel de la forma más exacta posible.

Para ello, se planteará un modelo energético de la doble piel (la zona en la que se centra el estudio). Este modelo estará alimentado no solo por variables teóricas, sino también de empíricas, haciéndolo más exacto. Las variables empíricas se obtendrán de mediciones en el edificio.

Las medidas en el edificio tendrán tres objetivos principales: caracterizar la doble piel, obtener las variables independientes del modelo y validar el modelo.

Existen muchos aspectos que caracterizan el flujo de calor a través de la doble piel. El objetivo de las medidas en el Edificio Lucía será establecer aquellos que sean, o bien más influyentes en el modelo, o aquellos que no se puedan obtener de forma teórica, para obtenerles mediante un estudio empírico. Este es el caso de la absorptividad y la transmitividad.

Las variables independientes del modelo son las condiciones climatológicas y la temperatura dentro del edificio. Dentro de las condiciones climatológicas se realizarán medidas tanto de temperatura exterior como de radiación. Gracias a estas medidas se podrá validar el modelo, y, de este modo, se podrán evaluar también las mejoras futuras.

La medida de la temperatura en la doble piel tendrá como único objetivo validar el modelo, ya que se comparará este valor con el obtenido de forma teórica y si se valida solo se utilizará el valor del modelo.

Los objetivos de cada medida se recogen en la tabla inferior:

Tabla II.17 Objetivos de cada medida

Medida	Objetivo
Absortividad, transmitividad	Caracterizar la doble piel
Condiciones climatológicas y temperatura del edificio	Obtener las variables independientes y establecer los ahorros
Temperatura de la doble piel	Validar el modelo

---

## 2. EQUIPOS DE MEDIDA

---

En este apartado se describirán los equipos utilizados para llevar a cabo las medidas realizadas en el Edificio Lucía.

### 2.1. Sondas de temperatura

---

En primer lugar se presentan las sondas de temperatura utilizadas. Estos equipos servirán para medir las temperaturas en el edificio Lucía y ofrecerán los datos necesarios para la validación del modelo.

Todas las sondas utilizadas son de la marca testo, pero dentro de ellas se diferencian dos modelos diferentes: testo 175 H1 y testo 175 T2. La sonda testo 175 T2 posee un sensor de temperatura externo que también será descrito.

#### testo 175 H1 - Datalogger de temperatura y humedad

---

A continuación se presenta el primer tipo de sondas con las que se llevarán a cabo las medidas experimentales en el Edificio Lucía de la Universidad de Valladolid:



Figura I.31 testo 175 H1

Sus características más reseñables son:

- Medición y documentación continua de la temperatura y la humedad relativa

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

- Medición a largo plazo sin problemas: gran capacidad de memoria para un máximo de 1 millón de valores de medición, pilas con autonomía para 3 años
- Rápido tiempo de reacción y medición precisa gracias al sensor de humedad externo
- Software ComSoft Básico disponible mediante descarga gratuita

[W1]

### **testo 175 T2 - Datalogger de temperatura de dos canales**

---

A continuación se presenta el primer tipo de sondas con las que se llevarán a cabo las medidas experimentales en el Edificio Lucía de la Universidad de Valladolid.



Figura I.32 testo 175 T2

Sus características más reseñables son:

- Para mediciones de larga duración: se pueden almacenar hasta 1 millón de valores, duración de la pila de hasta 3 años
- Se incluye soporte para pared
- Conforme a APPCC, certificado según EN 12830, grado de protección IP 65
- Evaluación de datos: tres versiones del programa disponibles, la descarga de la versión básica es gratuita

[W2]

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Para poder realizar la calibración es necesaria una sonda exterior ya que el equipo es demasiado grande y no puede introducirse en el horno de calibración. La sonda utilizada es una sonda de temperatura (NTC).

### *Sonda de temperatura (NTC)*

A continuación se presenta la sonda de temperatura utilizada:



**Figura I.33 Sonda de temperatura (NTC)**

Sus características más reseñables son:

- Sonda NTC con tubería especialmente plana (2 metros de largo) que se puede introducir por aberturas estrechas; por ejemplo, a través de las ranuras de las puertas.
- Medición de temperatura en pastas, medios semisólidos; así como, líquidos y aire.
- Rango de medición: de -40 hasta +125 °C.

[W3]

## **2.2. Testo ComSoft Básico**

---

Testo ComSoft Básico se trata de un Software comercial de la marca Testo, que permite la exportación de los datalogger al ordenador.

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

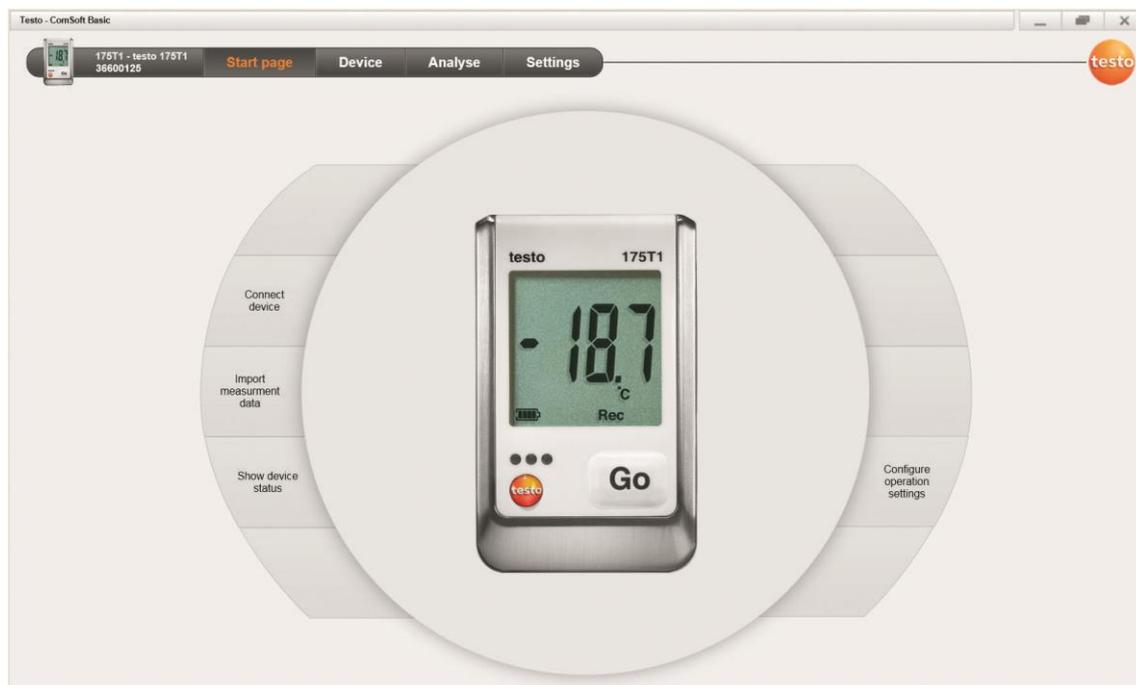


Figura I.34 Interfaz de usuario

Sus características más destacadas son:

- Interfaz intuitiva que guía al usuario paso a paso por cada procedimiento
- Curva gráfica para visualizar claramente los valores medidos
- Configuración del datalogger: criterio de inicio y parada, intervalo de medición, intervalo de memorización y ajuste de valores límite
- Cómodas funciones de exportación, p.ej. para procesar los datos en Microsoft Excel, o para generar un PDF y distribuirlo a otros usuarios [1].

### 2.3. Piranómetro

---

Para determinar la transmitividad de los cerramientos es necesario medir la radiación en diferentes puntos del edificio Lucía, por tanto, es necesario un equipo portátil como el que se presenta. Al ser la estación meteorológica fija no se pudo utilizar el piranómetro de la misma.



Figura I.35 Piranómetro

Se trata de un sensor de marca ALMEMO modelo FL A628 S. A continuación se darán los datos más representativos de las mismo:

Tabla II.18 Especificaciones del piranómetro

Especificaciones	Valor
Rango de medida	De 0 a 1500 W/m <sup>2</sup> , con una resolución de 0,1 W/m <sup>2</sup>
Rango espectral	De 0,3 a 30 $\mu$ m
Rango de operación	De - 40 a + 60 °C
Influencia de la temperatura	< 1% del valor medido de - 20 a + 40 °C
Peso	1 kg

[W4]

## 2.4. Sistema de Adquisición de Datos del piranómetro

Las medidas tomadas por piranómetro deben ser recogidas por medio del correspondiente sistema adquisición de datos (SAD). Este debe servir de interfaz entre el computador digital y el sistema físico, permitiendo capturar, acondicionar y procesar las señales eléctricas procedentes de diversos tipos de sensores (en este caso únicamente el piranómetro). Las señales serán transformadas, por medio del software de monitorización de datos, en valores numéricos que serán registrados en una hoja de texto. Para que esto suceda se necesita un dispositivo de almacenamiento externo USB para la recogida de datos. De esta manera se pueden extraer estos datos, integrarlos en

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

nuestro ordenador y darles uso en una hoja de Excel para hacer los cálculos necesarios y extraer las conclusiones pertinentes de la toma de datos.

En el estudio de la doble el aparato de medida utilizado fue el Adquisidor de datos Almemo 2390-5 de marca Ahlborn. Sus características principales se enumeran a continuación:

- 4 Canales.
- Convertidor A/D Delta-Sigma 16bit.
- Memoria de 32kB de 3700 a 6000 medidas.
- 7-9V 100mA máximo



[2] [3]

Figura I.36 Sistema de Adquisición de Datos del piranómetro

## 2.5. Estación meteorológica del Edificio Lucía

---

Hay una estación meteorológica ya existente en el Edificio Lucía. La estación meteorológica del Edificio Lucía posee varios sensores que ofrecen una gran cantidad de variables. La periodicidad de medida de la estación es de 10 minutos.

En la tabla inferior se presentan las variables recogidas por la estación meteorológica:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Tabla II.19 Sensores de la estación meteorológica

Sensor	Variable	Valor
Sensor de V/D de viento <sup>15</sup>	Velocidad del Viento	Medio
Sensor de V/D de viento	Velocidad del Viento	Máximo
Sensor de V/D de viento	Velocidad del Viento	Desviación estándar
Sensor de V/D de viento	Dirección del Viento	Medio
Sensor de V/D de viento	Dirección del Viento	Máximo
Sensor de V/D de viento	Dirección del Viento	Desviación estándar
Sensor de T/H del aire <sup>16</sup>	Temperatura del Aire	Medio
Sensor de T/H del aire	Temperatura del Aire	Máximo
Sensor de T/H del aire	Temperatura del Aire	Mínimo
Sensor de T/H del aire	Humedad Relativa	Medio
Sensor de presión	Presión Atmosférica	Medio
Piranómetro 1	Radiación Global	Medio
Piranómetro 1	Radiación Global	Máximo
Piranómetro 2	Radiación Global	Medio
Piranómetro 2	Radiación Global	Máximo
Fotómetro 1	Luminosidad	Medio
Fotómetro 1	Luminosidad	Máximo
Fotómetro 2	Luminosidad	Medio
Fotómetro 2	Luminosidad	Máximo
Fotómetro 3	Luminosidad	Medio
Fotómetro 3	Luminosidad	Máximo
Fotómetro 4	Luminosidad	Medio
Fotómetro 4	Luminosidad	Máximo
Pluviómetro	Precipitaciones	Acumulado

Se puede observar que hay varios sensores que recogen más de un dato y que hay datos recogidos por más de un sensor. El primer caso no es de extrañar ya que supone un ahorro en los equipos instalados pero en el segundo caso esto se debe a las diferentes orientaciones.

Para el estudio en la doble piel solo se tomaron los valores de radiación y de temperatura del aire medios. El valor medio hace referencia al último periodo medido. Estos valores se recogieron con las sondas:

<sup>15</sup> Sensor de velocidad y dirección del viento

<sup>16</sup> Sensor de temperatura y humedad del aire

Tabla II.20 Sensores utilizados

Sensor	Marca	Modelo
Sensor de T/H del aire	GEÓNICA	STH-S331
Piranómetro	HUKSEFLUX	SR20-T2-10

A continuación se darán los datos más representativos de las mismas:

### Sensor de T/H del aire

---

Como se ha dicho con anterioridad se trata de un sensor de marca GEÓNICA modelo STH-S331. Se puede ver una imagen del mismo a continuación:



Figura I.37 Sensor de T/H del aire

A continuación se darán los datos más representativos del mismo:

Tabla II.21 Características del sensor

Especificaciones	Valor
Rango de medida	Por defecto: -40° a +60°C
Precisión	±0.1°C
Resolución	0.01°C
Temperatura de almacenamiento y trabajo	-80° a +75°C

[4]

### Piranómetro

---

Como se ha dicho con anterioridad se trata de un sensor de marca HUKSEFLUX modelo SR20-T2-10. Se puede ver una imagen del mismo a continuación:



Figura I.38 Piranómetro

A continuación se darán los datos más representativos de las mismas:

Tabla II.22 Características del piranómetro

Característica	Valor
Incertidumbre de medida	< 1.2 %
Rango de espectro	De 285 hasta 3000 x 10 <sup>-9</sup> m
Rango de temperatura	De -40 hasta +80 °C
Precisión en función de la temperatura	<± 1 % (de -10 hasta +40 °C) <± 0.4 % (de -30 hasta +50 °C)

[W5]

## 2.6. Termocámara

---

La termocámara que se utilizó para realizar las medias de absortividad y temperatura en Edificio Lucía es la siguiente:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



**Figura I.39 Termocámara**

Se trata de una termocámara de marca FLIR modelo InfraCAM.

Sus características más destacadas son:

- Cámara digital: para aumentar la calidad de las imágenes sin importar la luminosidad del lugar.
- Picture in Picture (PIP) Fusion: Muestra imágenes térmicas sobre imágenes digitales.
- Amplio rango de temperaturas: de -20 hasta +350 °C
- Posibilidad de exportación mediante USB: Subida de imágenes rápida y sencilla mediante una tarjeta de memoria con USB.

[W6]

## **2.7. Medidor de la temperatura superficial**

---

Para poder comparar la temperatura obtenida mediante la termocámara con la real es necesario un medidor de temperatura superficial. El equipo utilizado está compuesto por un medidor multifunción y una sonda de superficie. A continuación se abordarán las características del medidor y del termopar de forma separada:

### **Medidor multifunción**

---

Se trata de un sensor de marca testo modelo 435. Se puede ver una imagen del mismo a continuación:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura I.40 Medidor multifunción

Sus características más destacadas son:

- Amplias funciones de medición gracias a sondas opcionales, p. ej., sondas de velocidad, sondas de humedad, sondas de intensidad de luz, de turbulencia y de estrés térmico
- Memoria de gran capacidad hasta un máximo de 10 000 valores de medición
- Visualización del punto de rocío, valores mínimos, máximos y promedios
- Software de PC incluido para analizar y documentar los datos de medición

[W7]

#### *Sonda de temperatura de superficie*

La sonda de superficie utilizada es de la marca Testo, se trata de una sonda de superficie de rápida reacción equipada con un termopar tipo K, modelo 0602 0393. Se puede ver una imagen de la misma a continuación:



**Figura I.41 Sonda de temperatura de superficie**

Sus características más destacadas son:

- Tiempo de respuesta rápido (3 segundos) gracias a la banda termopar
- Termopar tipo K
- También para superficies que no son planas
- Rango de medición durante breves períodos de hasta + 500 °C

[W8]

## 2.8. Cámara térmica

---

Una cámara térmica es un dispositivo que permite establecer unas determinadas condiciones térmicas en su interior, de modo que se pueda hacer la calibración de las sondas de temperatura.

La cámara térmica que se utilizó para la calibración de las sondas no se trata de un equipo comercial, por tanto no se pueden obtener sus características de catálogos. Para poder otorgar poder calorífico a la cámara existe una bombilla en el interior de la cámara que calienta la misma mediante radiación.

Sobre su funcionamiento solo cabe mencionar que posee un regulador todo o nada de temperatura, de modo que si la temperatura de la cámara supera la

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

temperatura de consigna la bombilla se apaga, y si la temperatura de la cámara es inferior a la temperatura de consigna la bombilla se enciende, calentado la cámara hasta que se alcanza la temperatura de consigna, momento en el cual la bombilla se apaga el proceso comienza de nuevo.

En el estudio del Edificio Lucía, la cámara térmica fue utilizada para la calibración de las sondas de temperatura que no disponían de una sonda exterior, ya que éstas no se pueden introducir en el horno de calibración, debido a su gran tamaño.

A continuación se muestra una imagen de la cámara:



Figura I.42 Cámara térmica

## 2.9. Horno de calibración

---

Para realizar la calibración de las sondas de temperatura se utilizará el horno de calibración que se presenta a continuación:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura I.43 Horno de calibración

Sus características técnicas son las siguientes:

Tabla II.23 Características del horno de calibración

<b>Rango de medida</b>	<b>De -25 °C hasta 140 °C</b>
	$\pm 0.25 \text{ °C}$
<b>Precisión</b>	para los agujeros mayores de 6.35 mm $\pm 1 \text{ °C}$
<b>Estabilidad</b>	$\pm 0.02 \text{ °C}$ a -25 °C $\pm 0.04 \text{ °C}$ a 140 °C
<b>Tiempo de calentamiento</b>	18 minutos de la temperatura ambiente a 140 °C
<b>Tiempo de enfriamiento</b>	20 minutos de la temperatura ambiente a -25 °C
<b>Tamaño (ancho x alto x largo)</b>	143 x 261 x 245 mm
<b>Peso</b>	5.7 kg

[W9]

---

## 3. CALIBRACIÓN DE SONDAS

---

Es importante asegurar que las sondas de temperatura midan de forma correcta. Para ello se calibrarán mediante un horno de calibración.

### 3.1. Calibración en horno

---

El horno de calibración utilizado se presenta a continuación:



**Figura I.44** Horno de calibración

En la imagen superior se puede observar que posee entradas para diferentes diámetros. Las sondas que se utilizaron para medir temperatura no disponían de ningún elemento que cupiera en la cámara.

Ya que para calibrar las sondas no se pudieron introducir en el horno de calibración (debido al poco tamaño disponible en la cámara y al gran tamaño de las sondas) se recurrió a utilizar la única sonda que posee un sensor externo:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

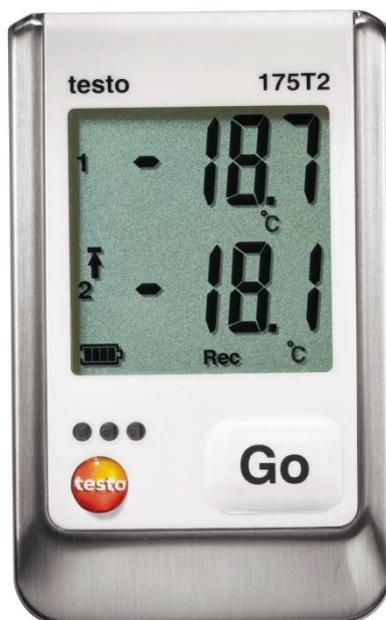


Figura I.45 sonda de temperatura

Ésta servirá como referencia para calibrar después las demás.

Para llevar a cabo la calibración se realizarán una serie de experimentos variando la temperatura de  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$  con una variación entre etapas de  $10^{\circ}\text{C}$ . La toma de datos se realizó cada minuto y el tiempo de medida mínimo que se estableció es de 10 minutos.

Durante todo el proceso de medición se siguieron las especificaciones del fabricante respecto al tiempo necesario por el equipo para pasar de una temperatura a otra, es decir, no se realizaron mediciones hasta que la temperatura no alcanzaba la consigna y se pasaba el tiempo especificado por el fabricante para que el horno estabilizara la misma. De esta manera se asegura no solo la temperatura en la medición sino también la estabilidad de temperatura del horno durante el tiempo de medida.

Como ejemplo de resultados se muestra a continuación la gráfica obtenida del experimento realizado a  $25^{\circ}\text{C}$ :

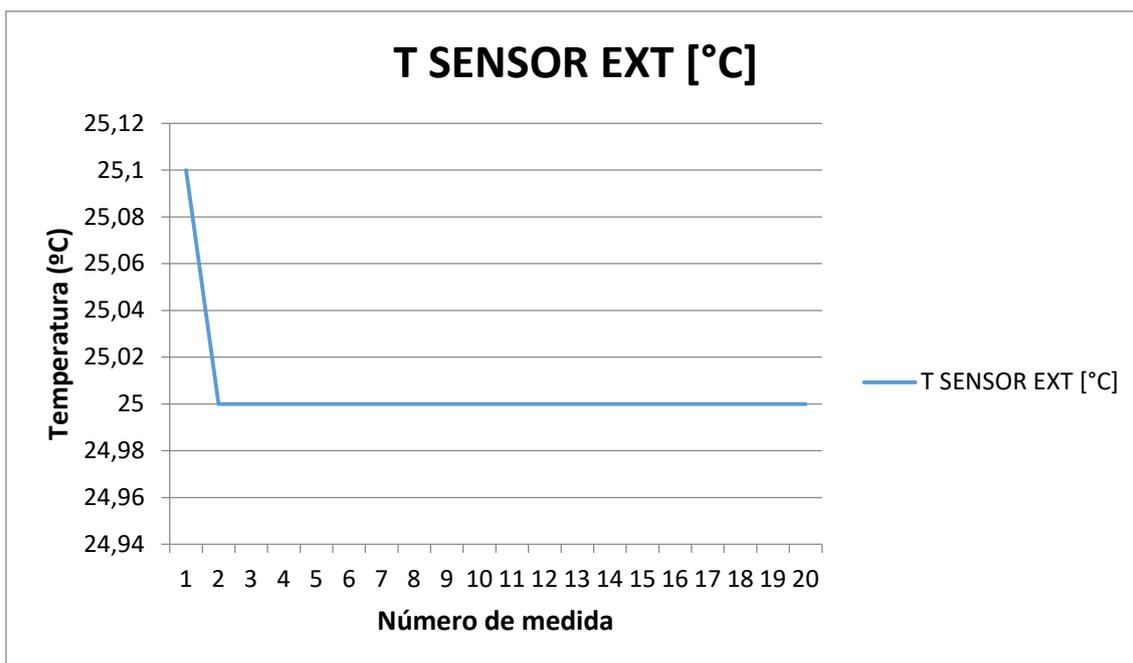


Figura I.46 Temperatura del sensor

Como se puede observar, salvo en caso de la primera medida (que es la que se obtiene al introducir el aparato en la cámara, y por tanto reflejará una temperatura que estará comprendida entre la de la cámara y la exterior y no será la de la cámara), la temperatura medida coincide exactamente con la temperatura de la cámara de calibración. Ésto también ocurrió con todos los experimentos realizados, aunque se entrará en detalle más adelante.

Una vez realizados todos los experimentos se comparó en una gráfica la temperatura de la cámara con la medida por la sonda:

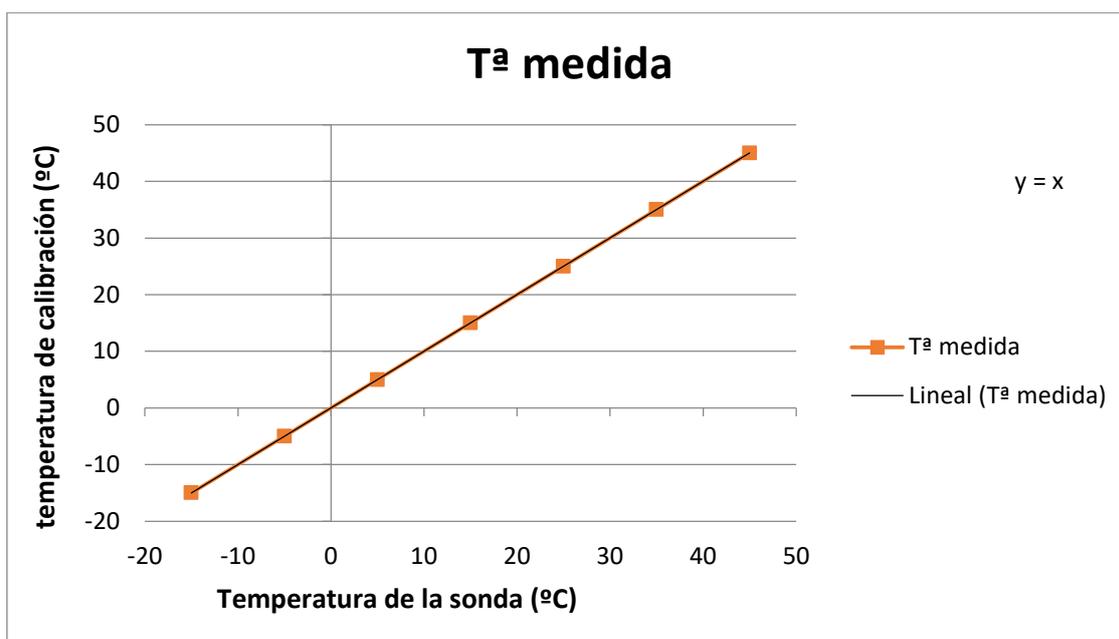


Figura I.47 Temperatura de la sonda frente a la temperatura real

Como era de esperar la relación obtenida es lineal. Se observa que la temperatura en la cámara coincide exactamente con la medida por la sonda y por tanto no es necesario ningún tipo de corrección. Por lo tanto, a partir de este momento se tomará la medida de la sonda como medida real sin realizar ninguna corrección sobre ella.

### 3.2. Calibración a temperatura ambiente

Una vez estudiada la corrección de la sonda de referencia se pasa a calibrar las demás.

Lo primero que se llevó a cabo fueron unas mediciones a Temperatura ambiente cuyos resultados son los recogidos abajo:

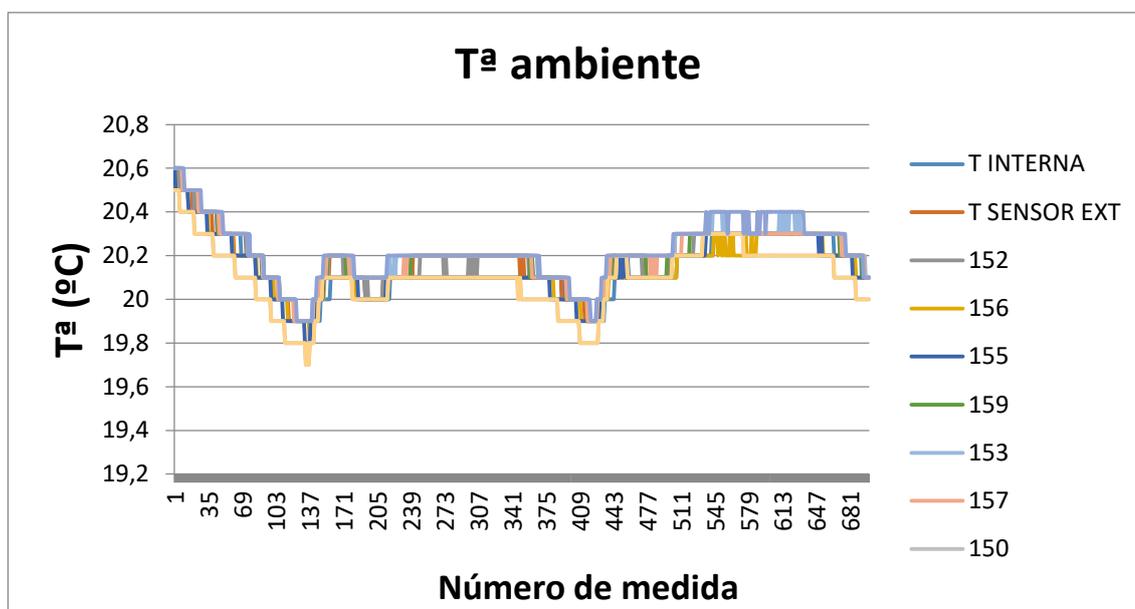


Figura I.48 Medidas a temperatura ambiente

Se observa que todas las sondas presentan un comportamiento muy parecido. Por tanto, la primera medida para calibrarlas fue suponer un error estacionario para cada sonda. Por esto, se construyó una tabla con las diferencias de cada sonda en cada momento que se presenta a continuación:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

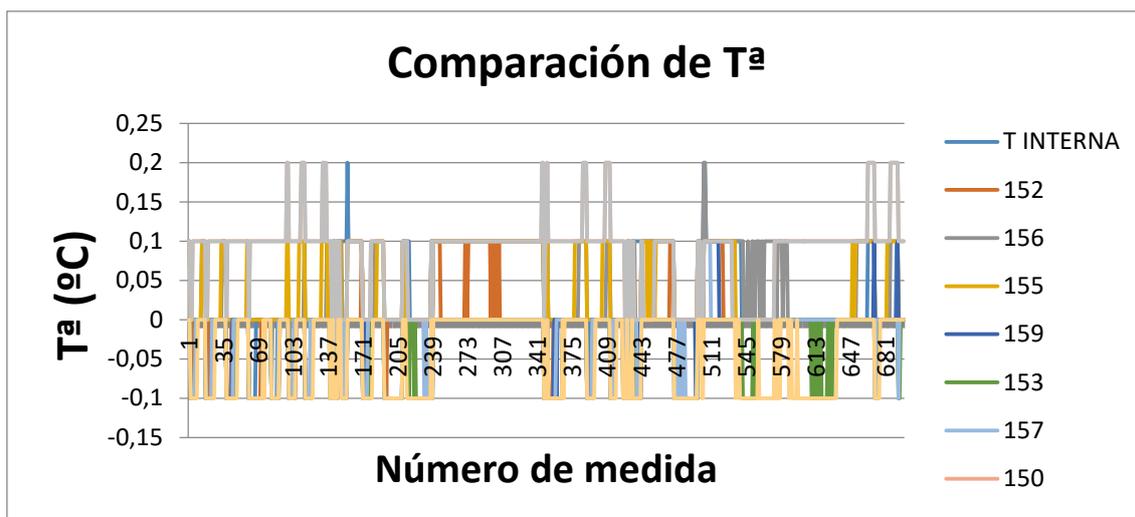


Figura I.49 diferencia de temperatura

Se puede observar que todas las medidas se alejan una o dos décimas como máximo de la referencia marcada, que en nuestro caso fue la de la sonda con exterior, que es la que se encuentra calibrada.

Siguiendo con la hipótesis del error estacionario se promedia el error cometido para cada aparato y se corrigen los valores medidos de los aparatos:

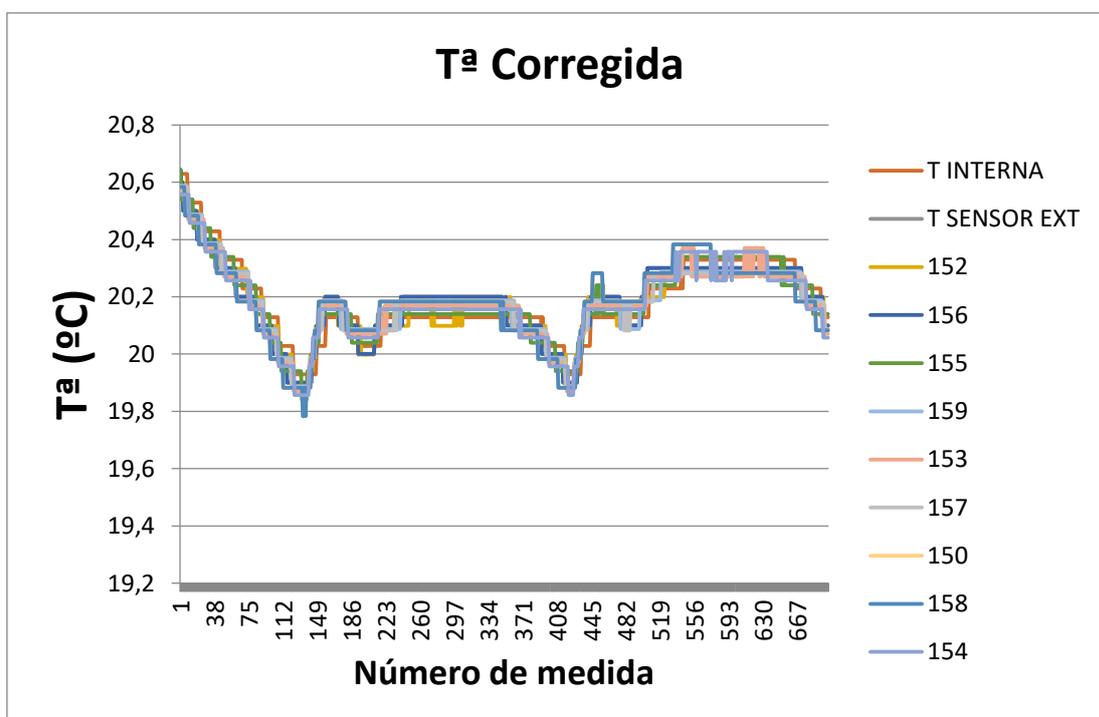


Figura I.50 Temperatura corregida

Ahora se observa que los valores de temperatura siguen aproximadamente la misma línea, lo cual quiere decir que se consigue estar más cerca de la temperatura medida por la sonda.

Ante los cálculos efectuados hasta ahora se plantea la siguiente cuestión: aunque se hayan conseguido ajustar los resultados, ¿son éstos verdaderamente fiables? Analizando con más detenimiento las gráficas vemos que la temperatura a la que se ha medido es prácticamente constante, en torno a 20°C.

### 3.3. Calibración a alta temperatura

Ante este hecho parecería lógico realizar una prueba con un rango más amplio de temperatura. Se introdujeron las sondas en una cámara térmica para poder variar la temperatura, obteniendo los siguientes resultados:

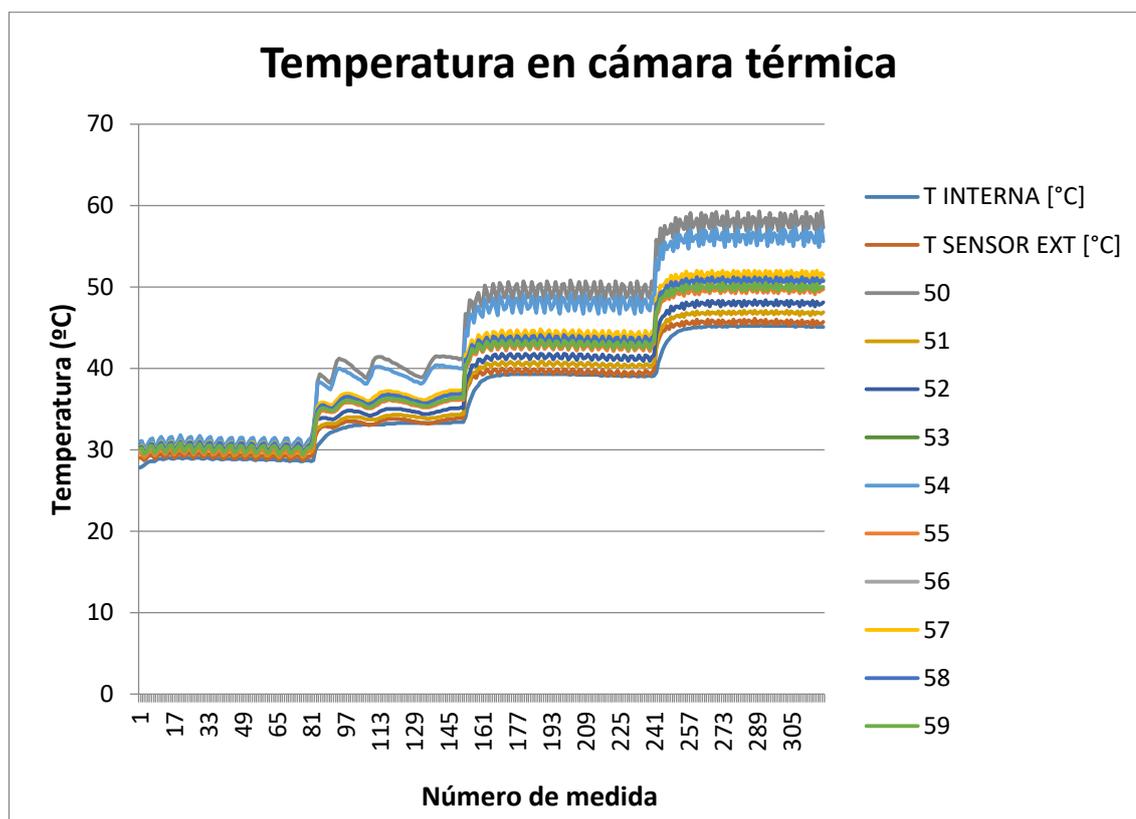


Figura I.51 Temperatura en cámara térmica

Las temperaturas a las que se realizaron las mediciones fueron de 30, 34, 40 y 45 grados centígrados aproximadamente. Nótese que la regulación en la cámara se realizaba mediante un termostato que se activaba cuando la temperatura bajaba por debajo de un valor estipulado, aumentando la temperatura hasta que esta se volvía a encontrar por encima de éste. Esto

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

produce los “picos” que se ven reflejados en la temperatura medida por las sondas.

Como se puede observar, existe una clara relación entre la temperatura medida por las sondas y la temperatura de la cámara, a mayor temperatura estas tienden a medir valores más altos. Además se puede apreciar que la relación es aproximadamente lineal ya que cuanto mayor es la temperatura, más se acentúan las diferencias.

A continuación se graficará la diferencia de temperaturas de las diferentes sondas:

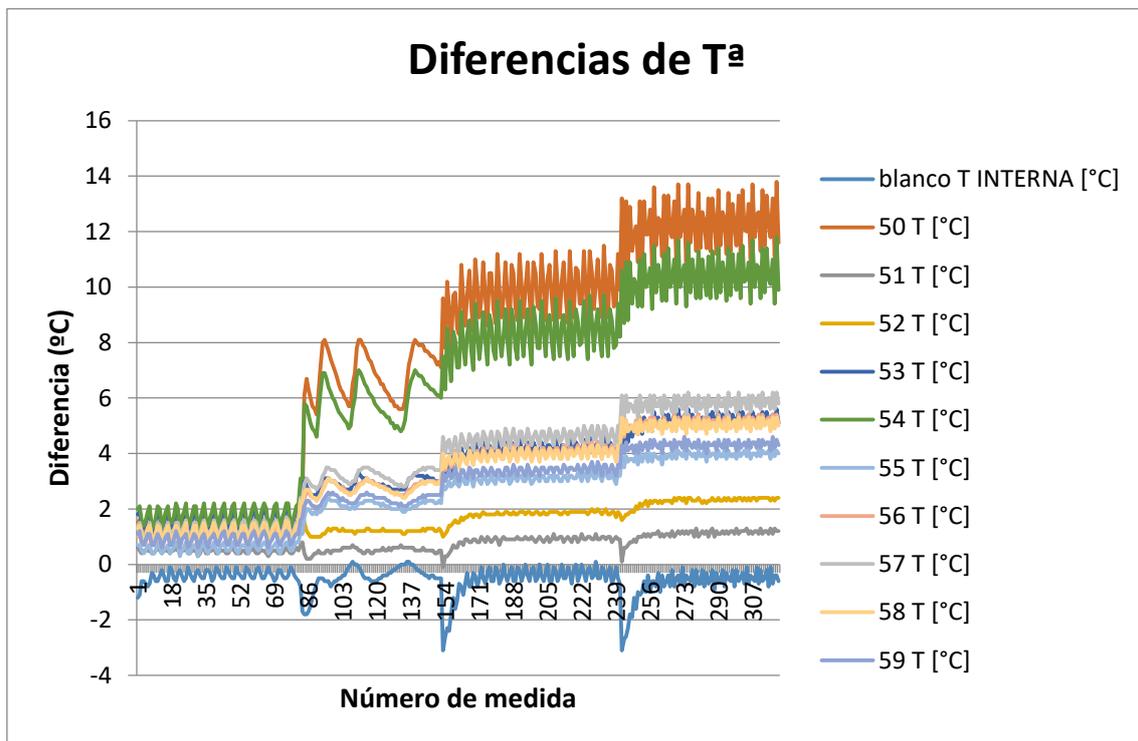


Figura I.52 Diferencias de Tª

Como se observa arriba se confirman las sospechas de que la variación depende de la temperatura y que lo hace de forma aproximadamente lineal con la misma.

A continuación se presenta un ejemplo de una de las sondas frente a la sonda ya calibrada que se denomina temperatura real:

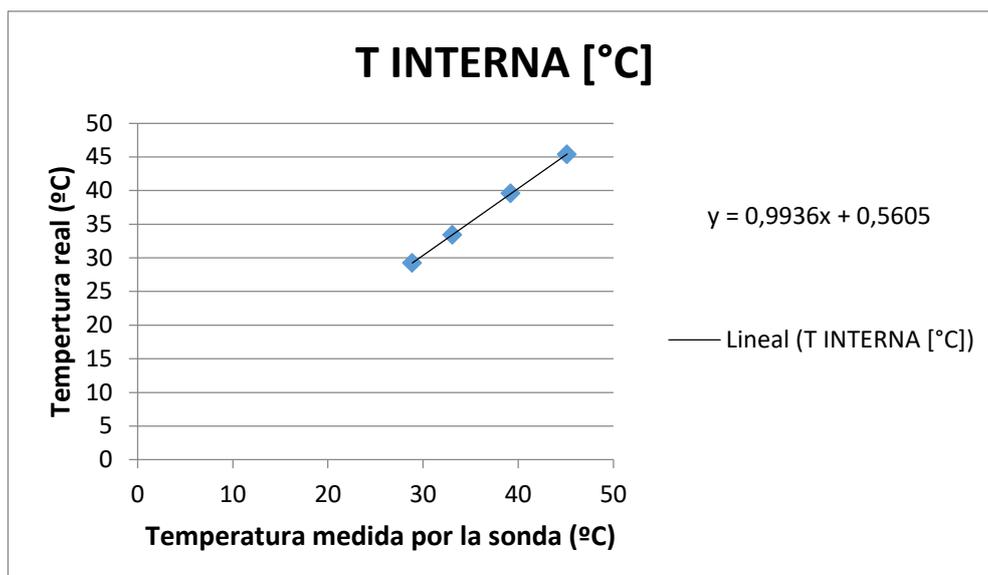


Figura I.53 Temperatura interna

Se observa que la relación es lineal, además a la derecha se puede observar la línea de tendencia asociada a la gráfica que al introducir el valor de la temperatura medida (x) dará como resultado el valor de la temperatura real (y).

Este procedimiento se realiza para cada una de las sondas de modo que una vez medidos los resultados se puedan obtener las temperaturas reales.

Se define la recta de ajuste como:

$$y = mx + n$$

Donde y representa la temperatura real y x representa la temperatura que mide la sonda. m y n son los coeficientes que dependerán del ajuste de cada sonda. Los coeficientes de las sondas se muestran a continuación:

Tabla II.24 Coeficientes m y n de cada sonda

	Sonda										
	interna	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
m	1,02	0,64	0,96	0,92	0,83	0,69	0,86	0,82	0,81	0,83	0,85
n	-0,22	8,00	0,90	1,60	3,52	6,65	3,18	3,87	4,12	3,73	3,23

Pero estos resultados también son parciales, ¿Qué ocurrirá a baja temperatura? Se podría predecir que las desviaciones de temperatura se acentúan a altas temperaturas ya que en el ejemplo a temperatura ambiente no se observaron grandes variaciones (en torno a una o dos décimas de grado) pero conviene comprobar, con evidencias experimentales, que este comportamiento será el predicho.

### 3.4. Calibración a baja temperatura

El laboratorio no cuenta con una cámara térmica de bajas temperaturas, es por esto que la experimentación previa solo se llevó a cabo por encima de la temperatura ambiente. Con el objetivo de obtener mediciones a temperaturas por debajo de la ambiente se colocan las sondas en el exterior, que se encuentra por debajo de la temperatura del laboratorio:



Figura I.54 Sondas en el exterior

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

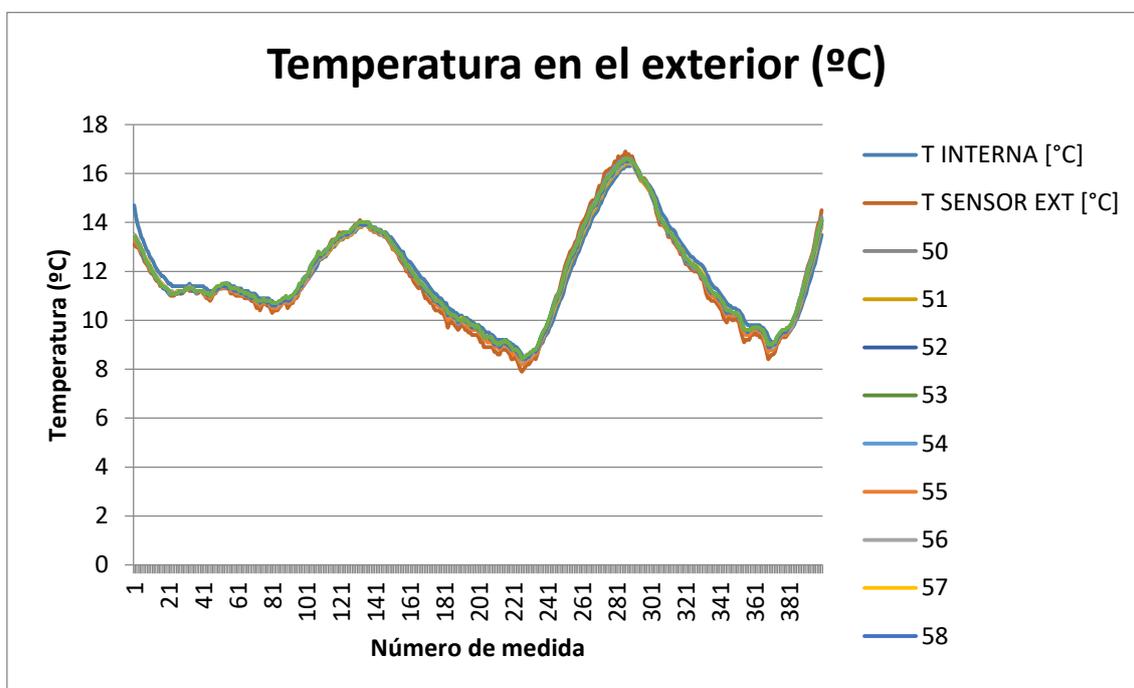


Figura I.55 Temperatura en el exterior

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Se intuye que la sonda exterior se adelanta ligeramente a las demás, es decir, que mide la temperatura antes que las demás. Esto se refleja en la gráfica en que la línea roja (la correspondiente a la sonda exterior) está, casi en todo momento, ligeramente a la izquierda de las demás.

Para poder observar con mayor precisión los resultados graficaremos como en los casos anteriores la diferencia de temperaturas:

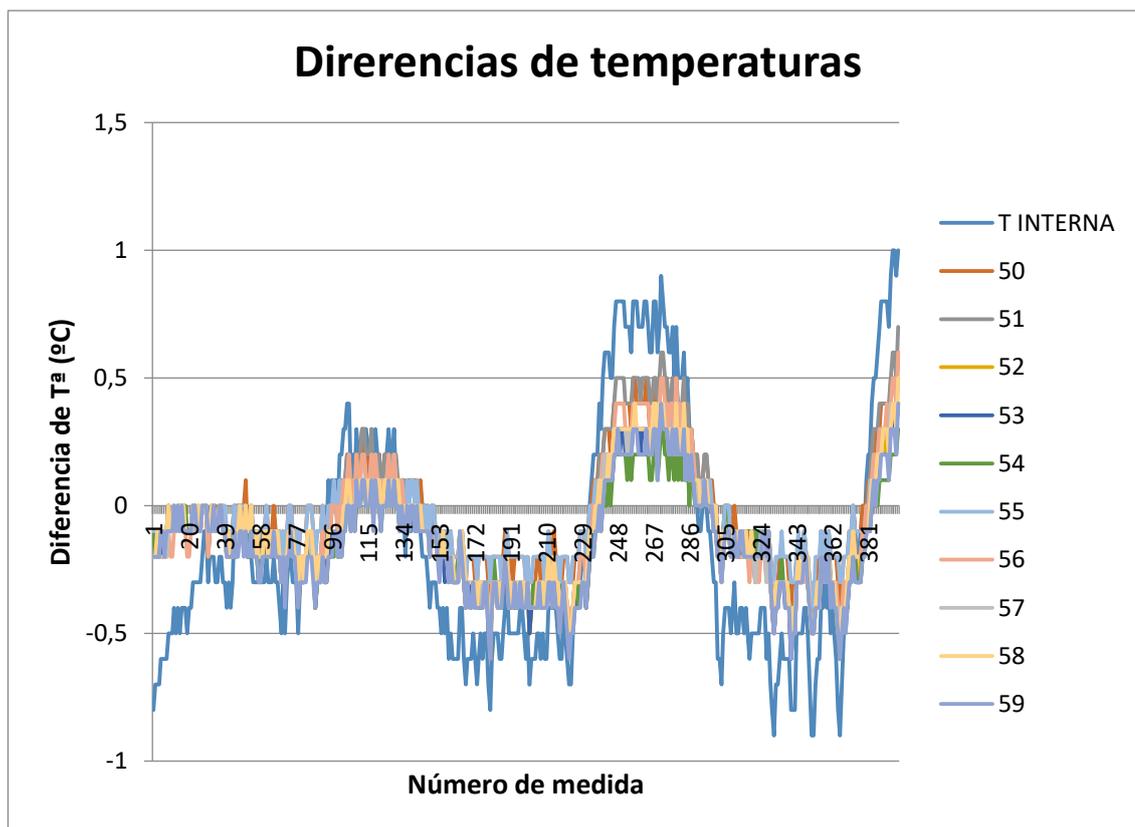


Figura I.56 Diferencias de temperaturas en el exterior

Se observa que las diferencias de temperaturas son bastante más grandes que en caso de temperatura ambiente, al contrario de lo esperado, y que a diferencia de éstas, donde las diferencias estaban siempre por encima o por debajo, ahora se alternan periodos donde están por encima o por debajo de la real (diferencia de temperatura 0°C). Al compararlas con la temperatura se observa que cuando la temperatura aumenta las sondas miden temperaturas por debajo de la real y que cuando la temperatura sube las temperaturas medidas son menores que la real.

A raíz de estos resultados cabe sopesar que la inercia térmica de la sonda de referencia es menor que la de las demás sondas y por tanto las demás sondas tardan más en dar el valor real de la temperatura en el exterior.

Para confirmar esta hipótesis se supondrán diferentes retardos en la medición de la sonda de referencia de tal manera que se pueda ver como

varía el error en las demás sondas. Los tiempos de retardo escogidos son de 5, 10, 15, y 20 minutos. Para los cuatro casos se ha introducido el retardo y posteriormente se ha corregido el error estacionario.

Primero se muestra el caso sin retardo y corregido el error estacionario:

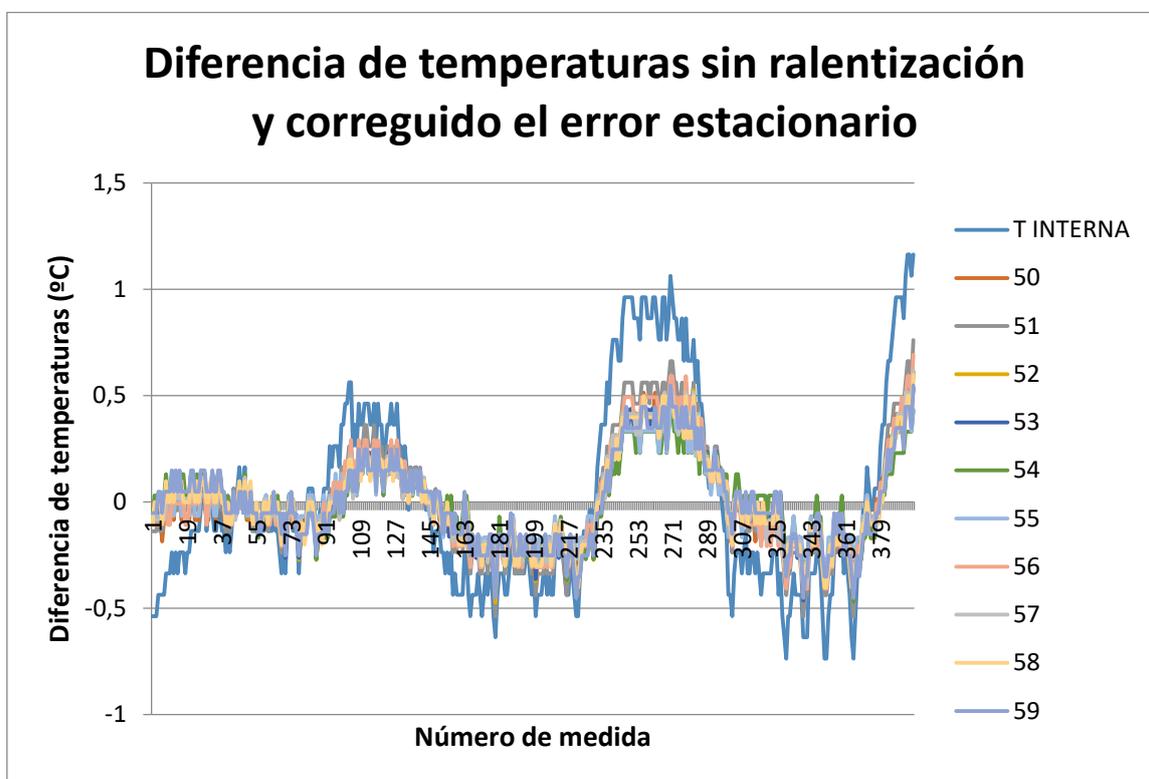


Figura I.57 Diferencia de temperaturas sin ralentización y corregido el error estacionario

Para un retardo de 5 minutos una vez corregido el error estacionario se obtiene la siguiente gráfica:

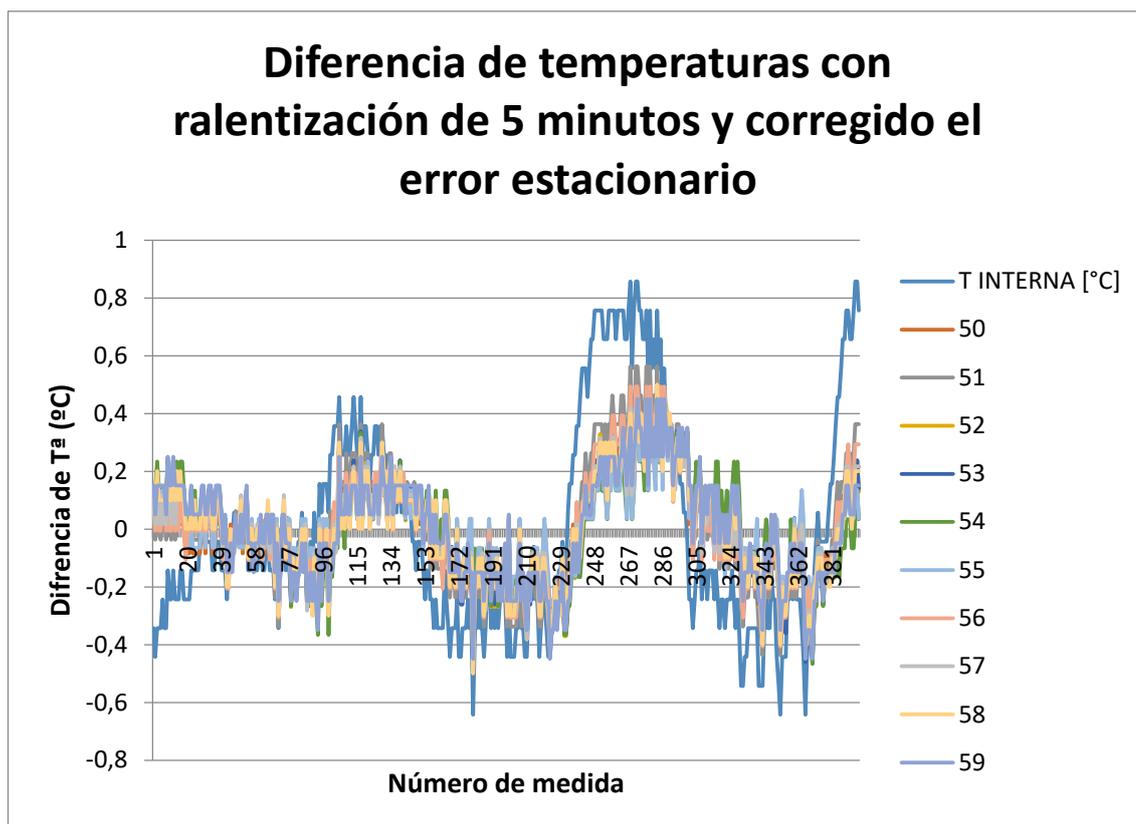


Figura I.58 Diferencia de temperaturas con ralentización de 5 minutos y corregido el error estacionario

Para un retardo de 10 minutos una vez corregido el error estacionario obtenemos la siguiente gráfica:

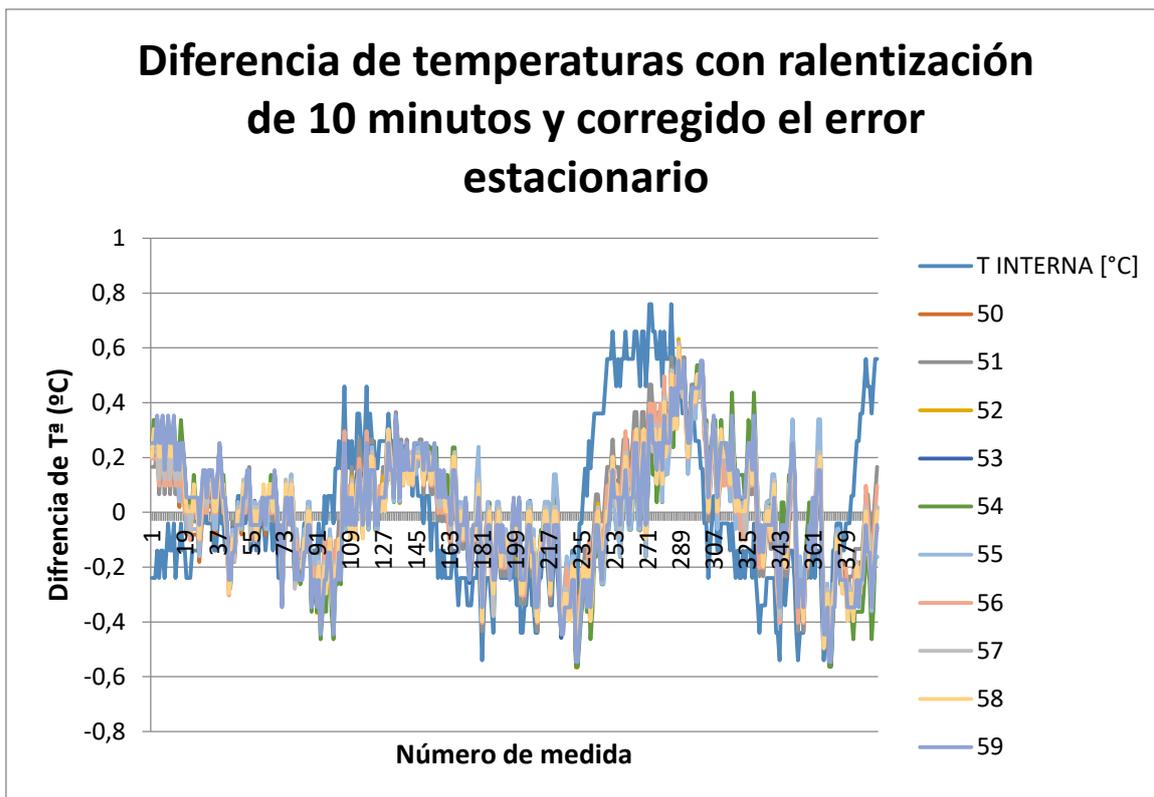


Figura I.59 Diferencia de temperaturas con ralentización de 10 minutos y corregido el error estacionario

Para un retardo de 15 minutos una vez corregido el error estacionario obtenemos la siguiente gráfica:

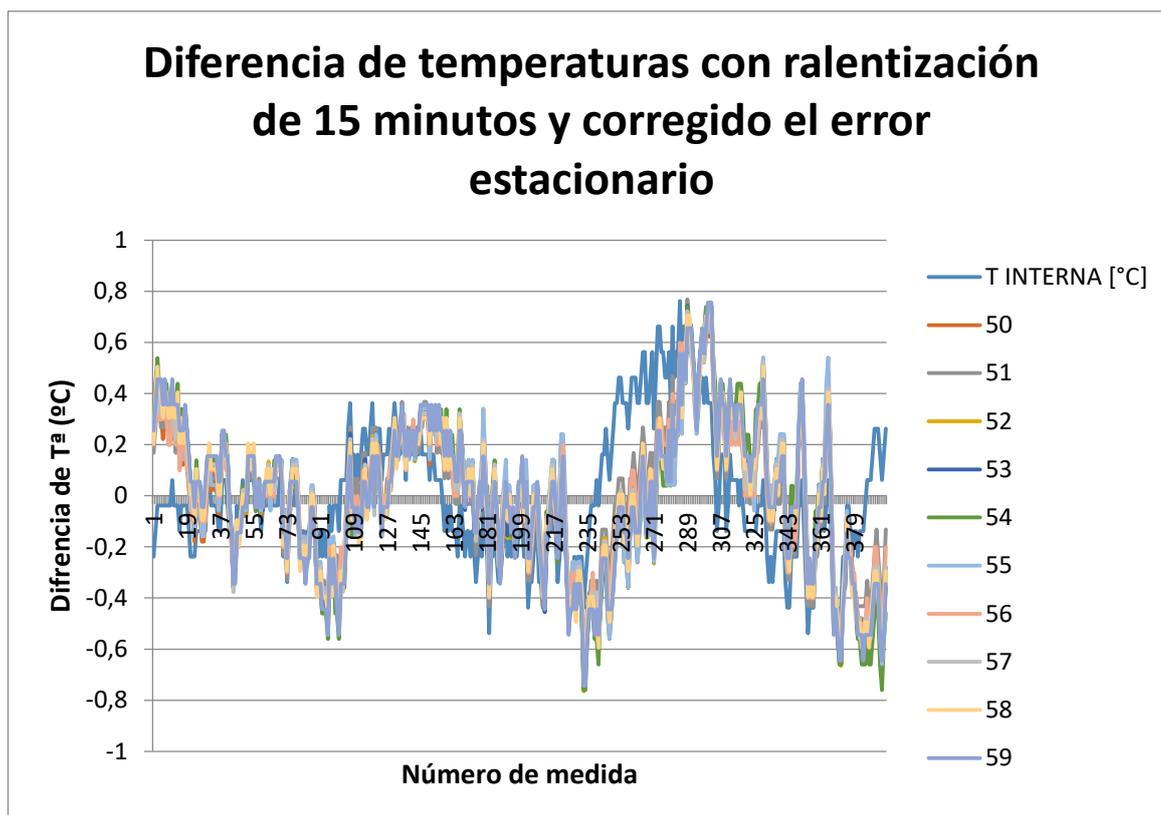


Figura I.60 Diferencia de temperaturas con ralentización de 15 minutos y corregido el error estacionario

Para un retardo de 20 minutos una vez corregido el error estacionario obtenemos la siguiente gráfica:

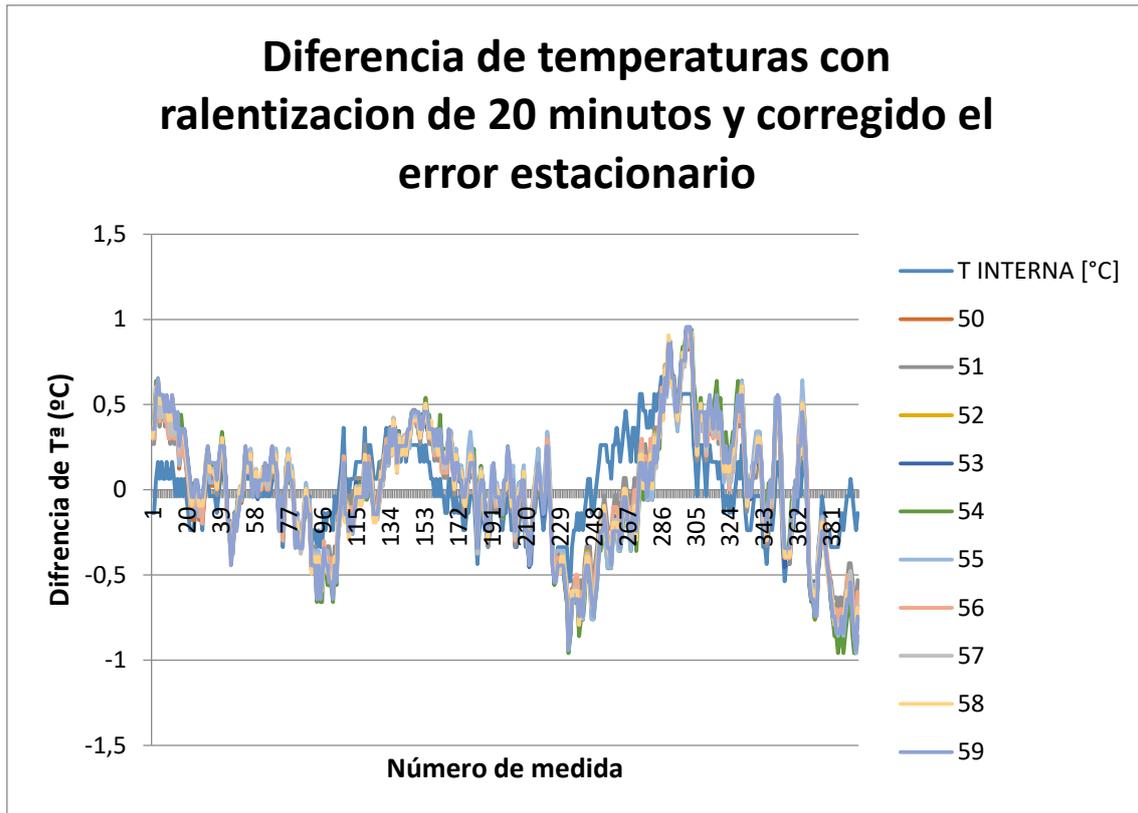


Figura I.61 Diferencia de temperaturas con ralentizacion de 20 minutos y corregido el error estacionario

¿Qué conclusiones se pueden extraer? Para empezar se ve con claridad que tanto para 10, 15 y 20 minutos se introducen amplísimas variaciones en períodos de tiempo muy pequeños. Esto hace que la diferencia de temperaturas sea muy inestable y se produzcan errores muy amplios. En el caso de ralentización de 5 minutos ya no se producen esas inestabilidades tan grandes. A pesar de esto, tampoco se observa una clara mejoría, es posible que el tiempo de ralentización óptimo de las sondas este comprendido fuera de los valores que se han establecido, pero este tiempo está limitado a valores múltiplos de 5 minutos, que es el tiempo de muestreo.

Por estas razones se rechazarán todas las ralentizaciones, ahora bien, ¿es correcto corregir el error estacionario? Aunque en un principio parece lo más lógico, el error estacionario va a estar fuertemente influenciado por las zonas en las que sube y baja la temperatura. Al corregir según el promedio del error los gradientes de temperatura influirán en ese error de modo que no será aplicable a otros casos. Además se ve que la diferencia de temperaturas está aproximadamente centrada en cero lo que quiere decir que la importancia de los gradientes de temperatura es mayor que la del error estacionario.

Ante lo comentado con anterioridad se extraen las siguientes conclusiones:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

- Para baja temperatura no se puede corregir las diferencias de temperatura debido a que el gradiente de temperaturas afecta a las sondas haciendo la calibración inexacta.
- Por otro lado, al disponer de cámara térmica y poder fijar una temperatura se consigue eliminar el efecto de los gradientes de temperatura dando validez a los resultados obtenidos para alta temperatura de modo que ahí sí que se introducirán las correcciones.

### 3.5. Curvas de corrección

---

Una vez definida la metodología para aplicar las correcciones es el momento de comenzar a calcular las diferentes curvas de corrección.

La curva vendrá definida por dos tramos: uno para baja temperatura y otro para alta temperatura. Como se ha definido antes, el primer tramo no tendrá correcciones, pero el segundo deberá aplicar las correcciones calculadas en el apartado "*calibración a alta temperatura*".

Para ello, es necesario determinar la temperatura a la cual se considera el cambio de a alta a baja temperatura.

Ya que no deben producirse discontinuidades en la temperatura medida por las sondas, se debe hallar el punto de corte entre las dos rectas que definen cada tramo y aplicar las correcciones según el tramo en el que se encuentre la temperatura estudiada.

#### Cálculo del punto de corte

---

Para calcular el punto de corte se deben conocer las rectas que definen cada tramo.

En el primer tramo (baja temperatura) no se aplican correcciones de modo que:

$$y = x \quad (E-II.1)$$

Donde  $y$  es la temperatura real y  $x$  es la temperatura que mide la sonda.

En el segundo tramo (alta temperatura) si se aplican correcciones. La corrección que se aplica es lineal, y viene definida por la recta:

$$y = mx + n \quad (E-II.2)$$

Donde  $y$  representa la temperatura real y  $x$  representa la temperatura que mide la sonda.  $m$  y  $n$  son los coeficientes que dependerán del ajuste de cada sonda. Los coeficientes de las sondas se recogen en la Tabla II.24.

El punto de corte cumplirá que la temperatura real ( $y$ ) sea la misma. A partir de aquí se puede plantear el cálculo del punto de corte ( $x_c$ ) como un sistema lineal de dos ecuaciones:

$$\begin{cases} y = x_c \\ y = mx_c + n \end{cases} \quad (\text{E-II.3})$$

Por tanto,

$$x_c = mx_c + n \Rightarrow x_c = \frac{(-n)}{(m - 1)} \quad (\text{E-II.4})$$

Donde se define el punto de corte como un cociente entre los coeficientes obtenidos del modelo de alta temperatura. El punto de corte de cada sonda es :

Tabla II.25 Puntos de corte de cada sonda

Sonda	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
interna	22,1	20,5	19,3	20,3	21,6	22,1	21,7	21,2	21,4	21,3
<b>13,6</b>										

Si bien la mayoría de los valores se encuentran en torno a 20°C, llama la atención el valor de 13,6 de la sonda interna. Sin embargo, si se vuelven a recoger los valores de los coeficientes  $m$  y  $n$  para esta sonda, se observa que al ser  $m$  muy parecido a la unidad, el valor de la temperatura medida apenas va a ser corregido, de modo que la calibración por alta temperatura no tendrá mucha influencia en el resultado final y apenas variará el valor en el rango de medida del punto de corte. De este modo, consideramos todos los puntos de corte como válidos.

Tabla II.26 Coeficiente  $m$  y  $n$  de la sonda interna

Coeficiente	Sonda interna
<b>m</b>	1,02
<b>n</b>	-0,22

## Ecuación de temperatura real

Una vez calculados los puntos de corte se pueden establecer las ecuaciones de temperatura real en función de la temperatura medida como:

$$\begin{cases} y = x, & x < x_c \\ y = mx + n, & x \geq x_c \end{cases} \quad (\text{E-II.5})$$

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Esta ecuación será válida para todas las sondas menos para la exterior, que no tiene corrección por alta temperatura. La temperatura medida por la sonda exterior se considerará igual a la real.

---

## 4. DESARROLLO DE EXPERIMENTOS EN EL EDIFICIO LUCÍA

---

Como se ha comentado con anterioridad, las mediciones en la doble piel tienen tres objetivos principales: caracterizar la doble piel, obtener las variables independientes del modelo y validar el modelo.

Las tres medidas que se realizaron en el Edificio Lucía fueron de: temperatura, radiación y absortividad. Los objetivos que esperaban cumplir cada una de ellas se recogen en la siguiente tabla:

Tabla II.27 Objetivos de cada medida

Medida	Objetivo
Temperatura	Obtener las variables independientes del modelo y validar el modelo
Radiación	Obtener las variables independientes del modelo y caracterizar la doble piel
Absortividad	Caracterizar la doble piel

Una vez conocidas las diferentes medidas y sus respectivos objetivos se analizará cada una de ellas más en profundidad.

### 4.1. Medidas de temperatura

---

Las primeras medidas que se realizaron en el edificio Lucía se corresponden con la toma de temperaturas en la zonas susceptibles de estudio. Éstas son: la doble piel, el interior del edificio y el exterior.

#### Objetivo de las medidas

---

El objetivo de estas medidas es doble: obtener las variables independientes del modelo y validar el modelo.

Las variables independientes del modelo son radiación, temperatura exterior y temperatura interior (para más información véase el apartado "modelo matemático de comportamiento" subapartado "Ecuaciones y balances en la doble piel "). En este apartado solo se indicará el procedimiento de recogida de las variables de temperatura. Para recoger la temperatura del interior del edificio se colocaron dos sondas de temperatura dentro del Edificio Lucía, una

en casa piso. Para recoger la temperatura del exterior del edificio se colocó una sonda de temperatura en el exterior del Edificio Lucía, en la cubierta.

Además, para poder validar las hipótesis realizadas durante el desarrollo del modelo (que no hay estratificación térmica ni gradientes de temperatura a lo ancho de la doble piel) se realizaron varias medidas de temperatura en la doble piel. Se tomaron tres temperaturas en cada piso para estudiar los gradientes de temperatura a lo ancho de la doble piel y se tomaron temperaturas en tres pisos diferentes para evaluar la estratificación térmica. El número de sondas utilizadas para la validación de las hipótesis ascendió a un total de 9 sondas.

### Disposición de las sondas

---

Teniendo en cuenta la posibilidad de estratificación térmica vertical y gradientes de temperatura a lo ancho de la doble piel se dispusieron las sondas distribuidas por toda la doble piel. La distribución se recoge en la tabla inferior. Todos los términos se refieren a un observador situado dentro del edificio. Además, también se incluye la disposición de las sondas en el interior del Edificio.

Tabla II.28 Disposición de sondas en el edificio Lucía

Piso	En el interior de la doble piel			En el interior del edificio Lucía
	izquierda	medio	derecha	
<b>3er piso</b>	55	51	52	*
<b>2º piso</b>	externa	interna	56	50
<b>1er piso</b>	58	53	59	54

\*Nota: en el tercer piso no hay zona interior, por tanto, no se pudo colocar una sonda en esa zona.

A continuación se presenta una sonda de temperatura en la doble piel:

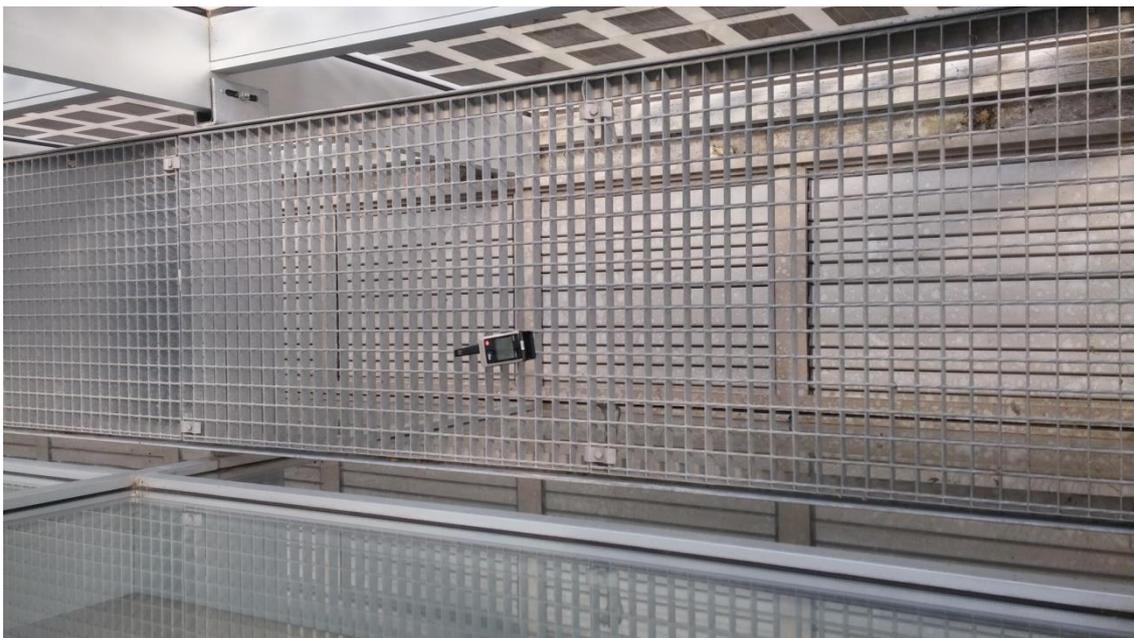


Figura I.62 Sonda en la doble piel

Además de las sondas previamente mencionadas también se colocó una sonda en el exterior del edificio Lucía para medir la temperatura exterior. La sonda que se utilizó fue la número 57, que fue colocada en el tercer piso.

## Toma de datos

---

El tiempo total de medición fue de un mes, desde el día 5 de noviembre a las 15:00, hasta el día 5 de diciembre a las 15:00. Las medidas se realizaban cada 5 minutos suponiendo un total de 8640 medidas.

Una vez acabado el periodo de medición, todas las sondas fueron recogidas y llevadas al laboratorio. Una vez allí, los datos fueron transferidos de los datalogger al ordenador y por medio del software "Testo ComSoft Básico " los datos fueron exportados en formato CSV para su posterior análisis en una hoja Excel.

Como se explicó con anterioridad, los datos ofrecidos por las sondas no representan con exactitud la realidad, es necesario aplicarles la corrección por alta temperatura descrita en el apartado de calibración de las sondas.

Una vez corregidos, los datos se presentan a continuación:

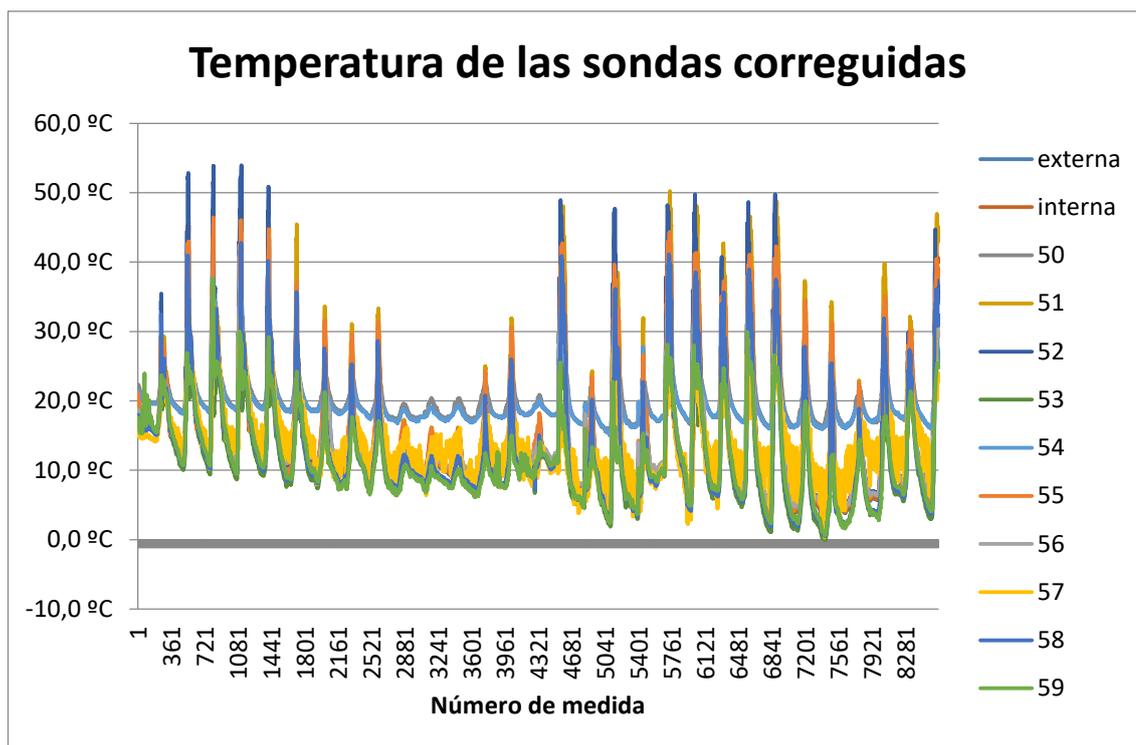


Figura I.63 Temperatura de las sondas correguidas

A pesar de la gran cantidad de líneas que se han graficado ya se puede atisbar el comportamiento de la doble piel. Durante las noches las temperaturas bajan y durante el día ascienden, llegando a temperaturas superiores a las del interior. Esto es precisamente lo que se aprovechará para introducir el aire caliente desde la doble piel al interior del edificio.

## Análisis de los datos

Una vez recogidos los datos es importante ver si se han producido errores en la medición como pérdida de datos, valores excesivos, disparidad entre las sondas, etc.

Para estudiar los datos con más detenimiento conviene disgregarles en tres grupos: temperaturas en la cámara, temperaturas en el exterior y temperaturas en el edificio.

Se empezarán estudiando los datos en la cámara:

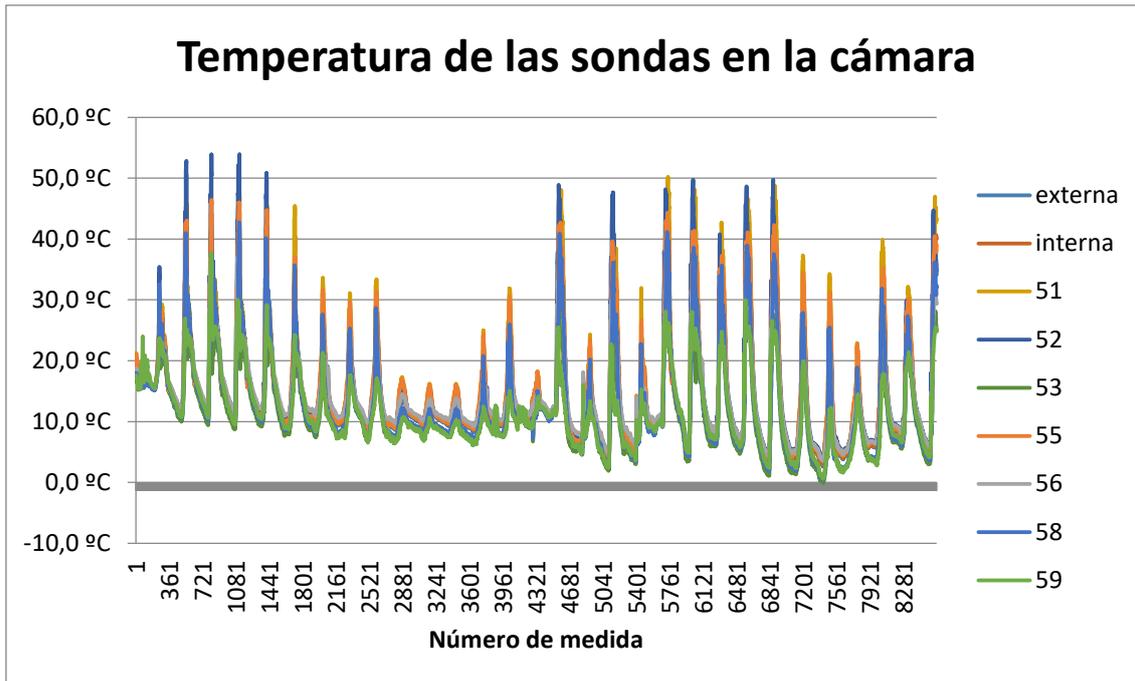


Figura I.64 Temperatura de las sondas en la cámara

Como se puede ver el comportamiento de las sondas es el esperado, con calentamientos durante el día y enfriamientos nocturnos

A simple vista se denota que ambas temperaturas son coherentes la una con otra. Ambas sondas se encontraban en posiciones similares, dentro de salas contiguas a la doble piel, una en el primer piso y otra en el segundo, de modo que aunque las mediciones no coincidan si deberían ser similares ya que en un piso las condiciones deberían ser similares a las del otro.

De momento se darán estos datos por validos, un segundo análisis más exhaustivo se realizará cuando se validen las hipótesis del modelo.

Se continuará el análisis estudiando las temperaturas en el interior del edificio. A continuación se presentan las temperaturas en el interior del edificio:

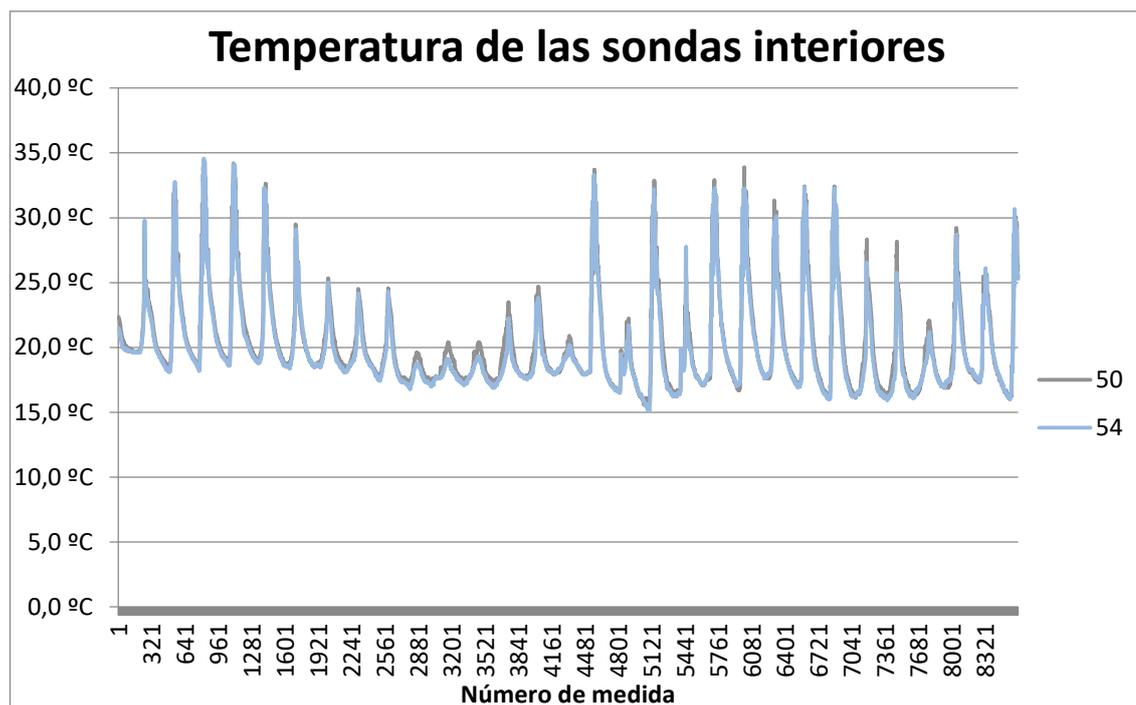


Figura I.65 Temperatura de las sondas interiores

A simple vista se denota que ambas temperaturas son coherentes la una con otra. Ambas sondas se encontraban en posiciones similares, dentro de salas contiguas a la doble piel, una en el primer piso y otra en el segundo, de modo que aunque las mediciones no coincidan si deberían ser similares ya que en un piso las condiciones deberían ser similares a las del otro.

Sin embargo, se aprecia que las temperaturas alcanzan valores excesivamente altos, superando incluso los 30 grados. El Edificio Lucía destaca por el control exhaustivo de las variables climáticas del edificio, entre ellas la temperatura. Ésta se controla por sectores, encendiendo los sistemas de calefacción o refrigeración según sea necesario. Existe un sensor de temperatura en la sala donde se producen las medidas de modo que es extraño que se alcancen temperaturas tan altas, ya que estas se consideran de disconfort y el sistema debería actuar para corregirlas.

Se plantea como posibilidad que el sistema no estuviera recogiendo los datos correctamente o que hubiera algún problema en la producción de frío en el edificio durante el periodo señalado, por ejemplo por mantenimiento. Ante tal hecho se pretende contrastar los valores medidos por las sondas con aquellos que recoge el sensor del Edificio Lucía. Para tal efecto se recurrió a recopilar los datos de las sonda de la sala del Edificio Lucía donde se realizaron las medidas, en caso de que faltara algún dato en uno de los dos pisos se tomaría como valor de temperatura la del otro piso, bajo la suposición de que la variación de temperaturas entre pisos sería pequeña. Estos datos se recogen abajo :

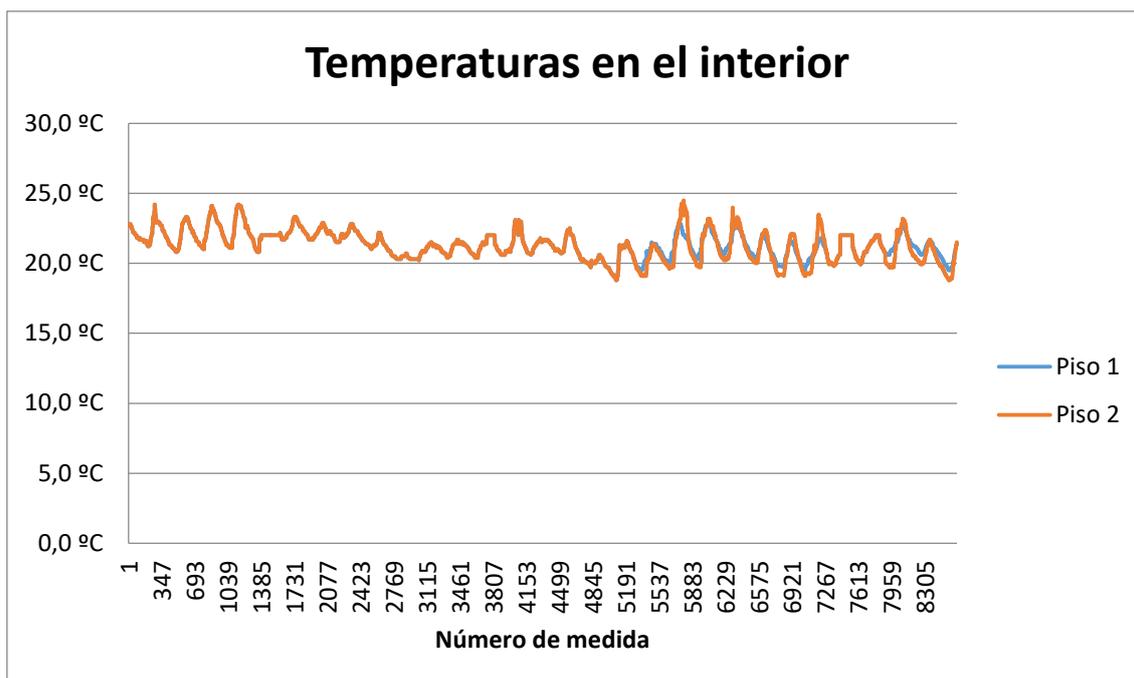


Figura I.66 Temperaturas en el interior

Donde se aprecia que la suposición de que la variación de temperaturas entre pisos sería pequeña es cierta y se da la hipótesis como válida.

Aquí se puede apreciar como las temperaturas se encuentran en un rango más razonable de entre 20 y 25°C. Si bien parece que se pueden tomar como correctas las medidas de la temperatura del aire del Edificio Lucía por las sondas del mismo solo cabe pensar porqué las sondas colocadas no midieron con corrección.

La respuesta radica en la posición de las sondas. Para evitar problemas de que alguien moviera las sondas de lugar, o bien por accidente o bien por motivos de limpieza se colocaron en puntos alejados del tránsito, cercanos a la doble piel. Esto se puede apreciar en la imagen inferior:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



**Figura I.67 Colocación de la sondasen el interior del edificio**

En estos puntos la radiación incidente es cuantiosa. Además, el suelo es de aluminio, que es un buen conductor del calor. En los momentos en los que la radiación es alta, las placas de aluminio se calientan, transfiriendo calor a los sensores, que ofrecen una temperatura que no se corresponde con la real.

Por todo lo comentado anteriormente se optó por utilizar la temperatura medida por la estación meteorológica del Edificio Lucía desechando la medida de las sondas.

Se finalizará el análisis estudiando las temperaturas en el exterior del edificio. A continuación se presentan las temperaturas en el exterior del edificio:

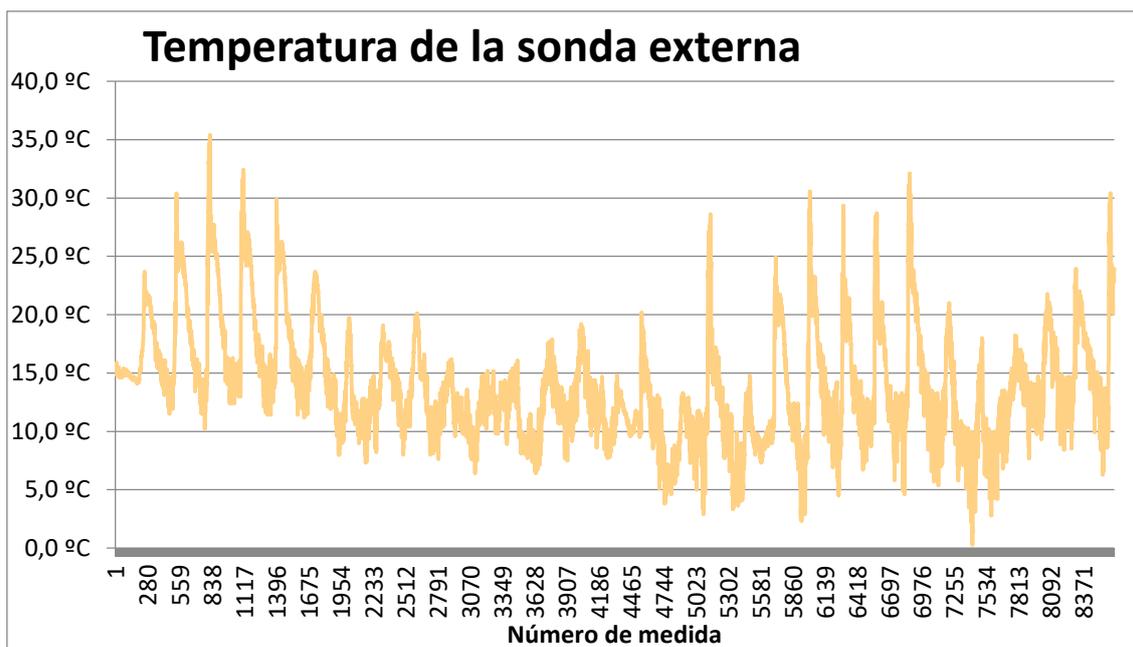


Figura I.68 Temperatura de la sonda externa

Lo primero que se aprecia en la gráfica es la amplia variación de temperaturas que se produce. Los valores van desde 35°C en los momentos más calientes hasta valores de 0°C en los momentos más fríos. Cabe recordar que si bien la temperatura de 0°C no es extraña en los meses de noviembre y diciembre, la temperatura de 35°C parece muy elevada para un mes de otoño.

El Edificio Lucía posee una estación meteorológica que mide la temperatura exterior. Se pretende contrastar los valores medidos por las sondas con aquellos que recoge el sensor del Edificio Lucía. Para tal efecto se recurrió a recopilar los datos de la sonda de la estación meteorológica del Edificio Lucía:

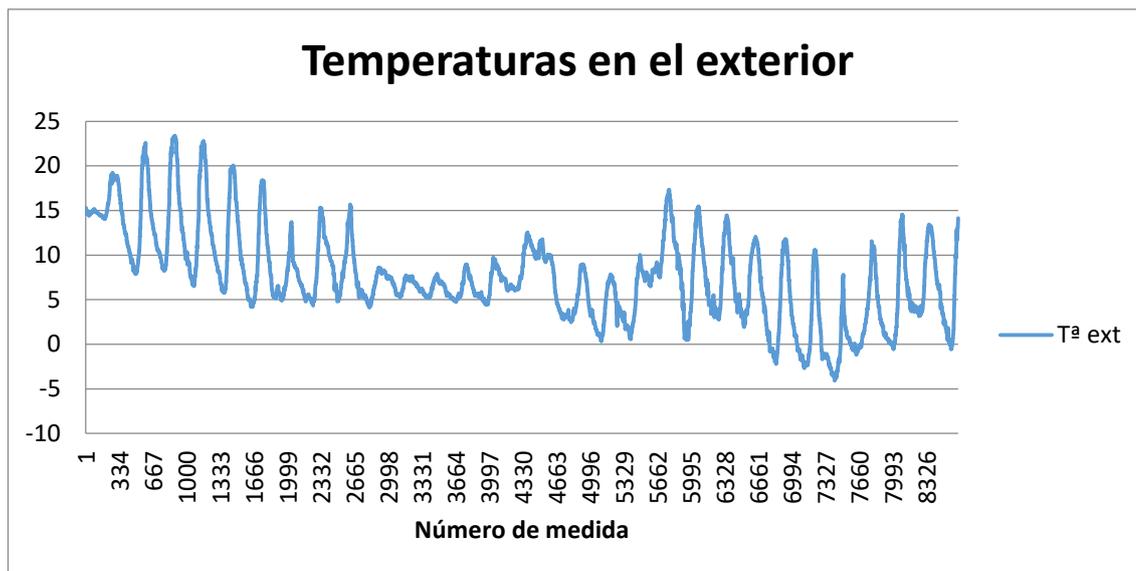


Figura I.69 Temperaturas en el exterior

Aquí se puede apreciar como las temperaturas se encuentran en un rango más razonable de entre -5 y 25°C. Si bien parece que se pueden tomar como correctas las medidas de la temperatura del aire de la estación meteorológica del Edificio Lucía solo cabe pensar porqué la sonda colocada no midió con corrección.

La respuesta radica de nuevo en la posición de las sondas. Por el mismo motivo que en el caso anterior: para evitar problemas de que alguien moviera las sondas de lugar, o bien por accidente o bien por motivos de limpieza se colocaron en puntos alejados del tránsito, esta vez cercano a la pared del edificio. Además, al encontrarse esta sonda en el exterior es necesario protegerla de las condiciones climatológicas de modo que se colocó lo más resguardada posible en un retranqueo que posee la pared. Esto se puede apreciar en la imagen inferior:



Figura I.70 Colocación de la sonda en el exterior

En estos puntos la radiación incidente es cuantiosa. En los momentos en los que la radiación es alta los cerramientos cercanos a la sonda se calientan, registrando una temperatura que no se corresponde con la real. La sonda exterior de la estación meteorológica del edificio Lucía no presenta este problema ya que posee una cubierta protectora para evitar precisamente este problema. Además, al estar resguardada la temperatura recogida no es la exterior si no que se encuentra entre la exterior y la del interior del edificio (cosa que se puede apreciar durante las noches).

Por todo lo comentado anteriormente se optó por utilizar la temperatura de la estación meteorológica del Edificio Lucía.

## 4.2. Medidas de radiación

---

Durante el TFG se realizaron dos tipos de medidas de radiación. Los objetivos de la mismas fueron: conocer las condiciones exteriores y la transmitividad.

### Radiación exterior

---

Durante el periodo de estudio de temperaturas también se realizaron medidas de radiación para obtener la radiación como variable independiente y poderla utilizar en el modelo. Estos datos se tomaron en la estación meteorológica del Lucía y fueron transferidos mediante CSV para su posterior análisis.

El tiempo de muestreo de la estación meteorológica es de 10 minutos, tomando como valor la radiación media durante ese periodo. Para establecer el mismo tiempo de medida que los datos de temperatura fue necesario

"duplicar los datos" ya que estos se tomaban cada 5 minutos. Al ser los datos de radiación media (en vez de instantánea) no se distorsiona el modelo, ya que el dato medido se supone constante durante ese periodo. Sin embargo, en caso de que se hiciera la media entre los valores de temperatura medidos la distorsión sería mayor ya que se perderían la mitad de los datos y el modelo tendría un menor número de datos para analizar.

La medición de la radiación se realiza sobre superficie horizontal y se mide en  $W/m^2$ . Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

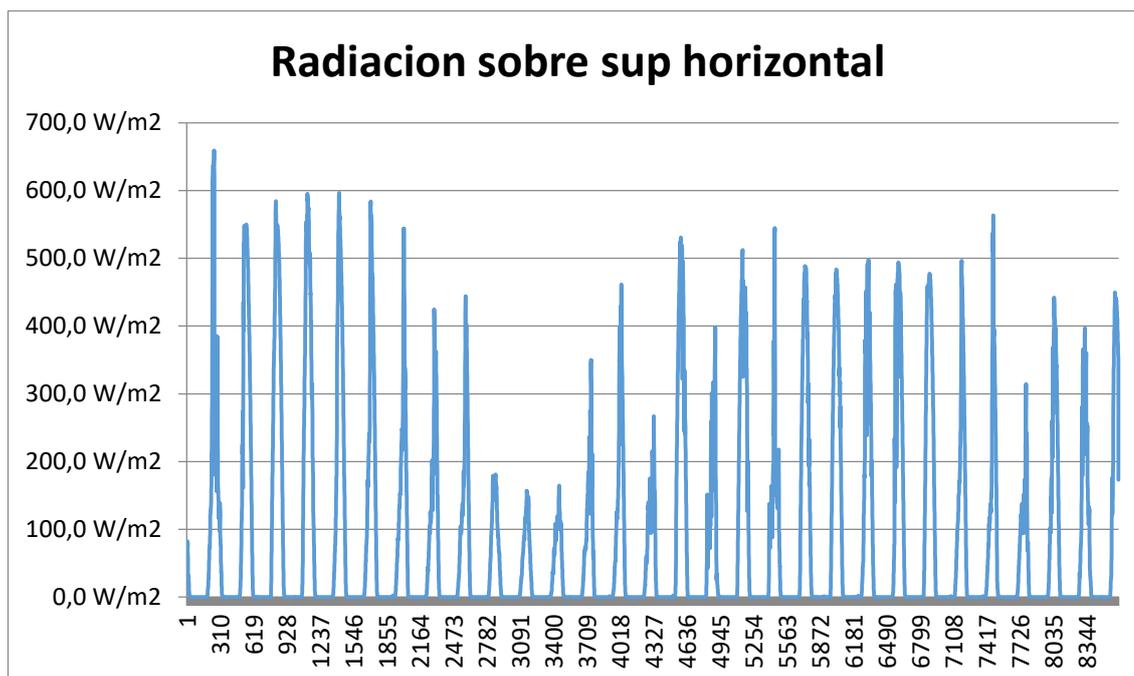


Figura I.71 Radiación sobre sup horizontal

## Cálculo de la transmitividad

Para poder caracterizar de forma apropiada la doble piel es necesario conocer las características térmicas de los materiales que la componen. Entre estas características se encuentra la transmitancia, que representa la cantidad de radiación que atraviesa un cuerpo sin ser absorbida o reflejada.

Para conocer los valores de las transmitancias en la doble piel se realizaron medidas de radiación tanto delante como detrás de los diferentes cerramientos. El valor de la transmitancia se corresponde con el cociente de la radiación medida delante y detrás del cerramiento.

Para el estudio de la doble piel es necesario conocer las transmitancias de los cristales y de los paneles fotovoltaicos ya que los cerramientos de hormigón y de aluminio se consideran opacos. Se considera que los cerramientos opacos no transmiten la luz y por tanto su transmitividad es cero.

## Medidas realizadas

---

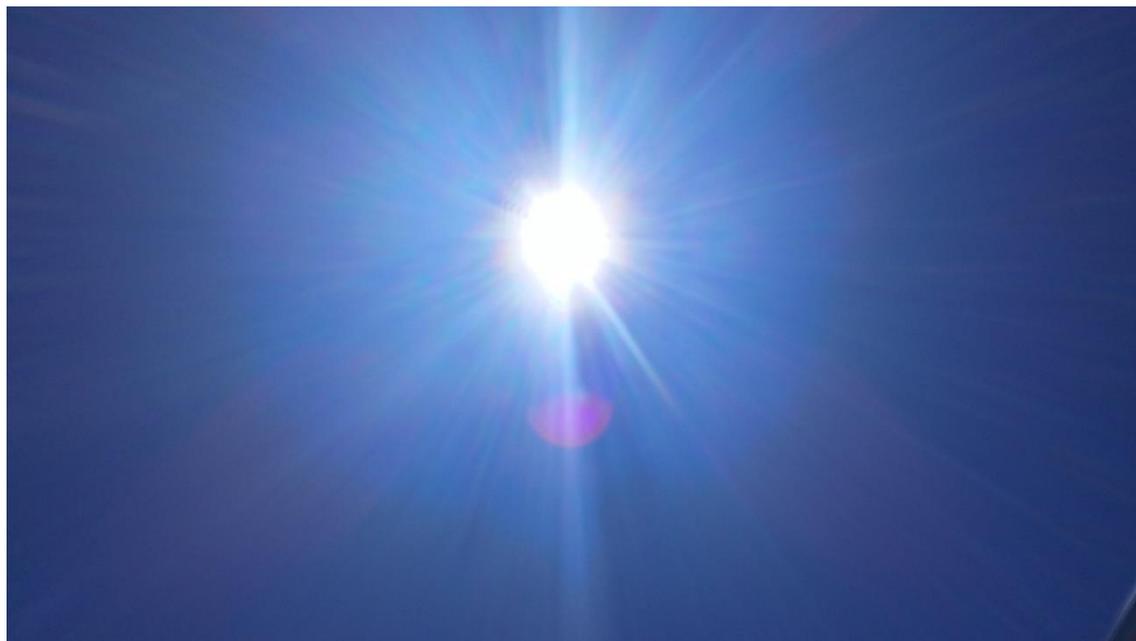
Se realizaron un total de 7 mediciones. Para cada medición se emplearon en torno a 10 minutos. La radiación se tomó cada 5 segundos.

En la tabla siguiente se presentan los datos más representativos de cada experimento:

Tabla II.29 Medidas en el Lucía

Número de medida	Zona	Tiempo de medición aproximado (min)	Hora de inicio
1	Exterior	10	13:46
2	Interior edificio	10	14:02
3	Interior de la doble piel	10	14:15
4	Exterior	10	14:31
5	Detrás del fotovoltaico	10	14:50
6	Detrás del vidrio en la cámara	10	15:02
7	Exterior	10	15:17

Para una mayor fiabilidad en los experimentos estos se realizaron en las horas centrales del día, cuando el Sol está en su zenit, para que los datos fueran lo más homogéneos posibles. Además, también se procuró que el día escogido fuera claro (sin nubosidad) para que esta no afectará a las medidas.



**Figura I.72 Imagen de día de la toma de medidas de radiación**

Para el cálculo de la transmitividad se utilizó el piranómetro descrito en el apartado de equipos de medida. Todas las medidas se realizaron en vertical en la dirección de la doble piel. Para asegurar que todas las medidas se hacían en vertical y que todas tuvieran el mismo ángulo se recurrió a crear una estructura que asegurara la posición de la sonda:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



**Figura I.73 Piranómetro con la estructura**

La verticalidad de la misma fue asegurada mediante un nivel.

Un ejemplo de los datos medidos se presenta a continuación:

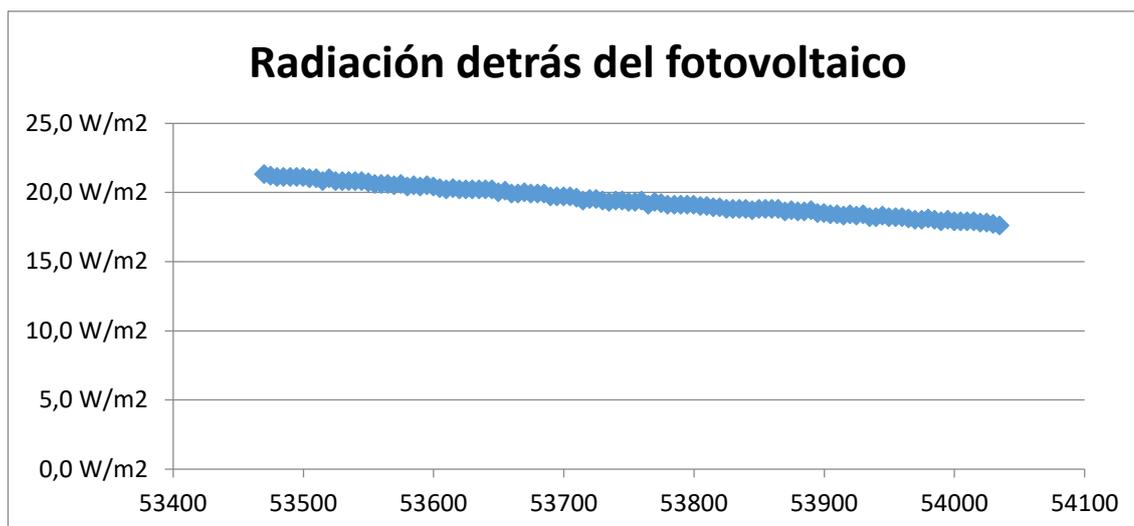


Figura I.74 Radiación detrás del fotovoltaico

## Cálculo de la transmitividad

Una vez realizadas las mediciones ya se tienen los datos necesarios para poder calcular la transmitividad de los cerramientos. La transmitividad se obtiene como el cociente entre la radiación incidente y la que atraviesa las diferentes superficies.

Solo se tiene un medidor de radiación de modo que no se puede medir en el cerramiento delante y detrás al mismo tiempo. Además, durante el periodo de medida la radiación no es constante, de modo que no se pueden dividir los valores obtenidos para obtener la transmitividad de forma directa.

Para resolver este problema se supone la radiación lineal en el periodo de medida, que si bien no es una suposición exacta, al ser los tiempos de medida cortos es lo suficientemente precisa para realizar el cálculo. Esta suposición se realizará con cada medida delante y detrás de los cerramientos obteniendo así la radiación en cada periodo. Para obtener la radiación exterior fuera de esos periodos se realizará el modelo de regresión con los periodos anterior y posterior a la medida, aumentando de este modo la precisión.

La radiación queda definida como:

$$y = mx + n \quad (\text{E-II.6})$$

Donde  $y$  representa la radiación y  $x$  representa la medida.  $m$  y  $n$  son los coeficientes que dependerán del número de medida. Como se ha comentado con anterioridad para la radiación exterior se han tomado 2 periodos de medida de modo que estos se identificarán por los dos periodos de medida separados por un guión.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Las gráficas de cada medida con su recta asociada se representan a continuación:

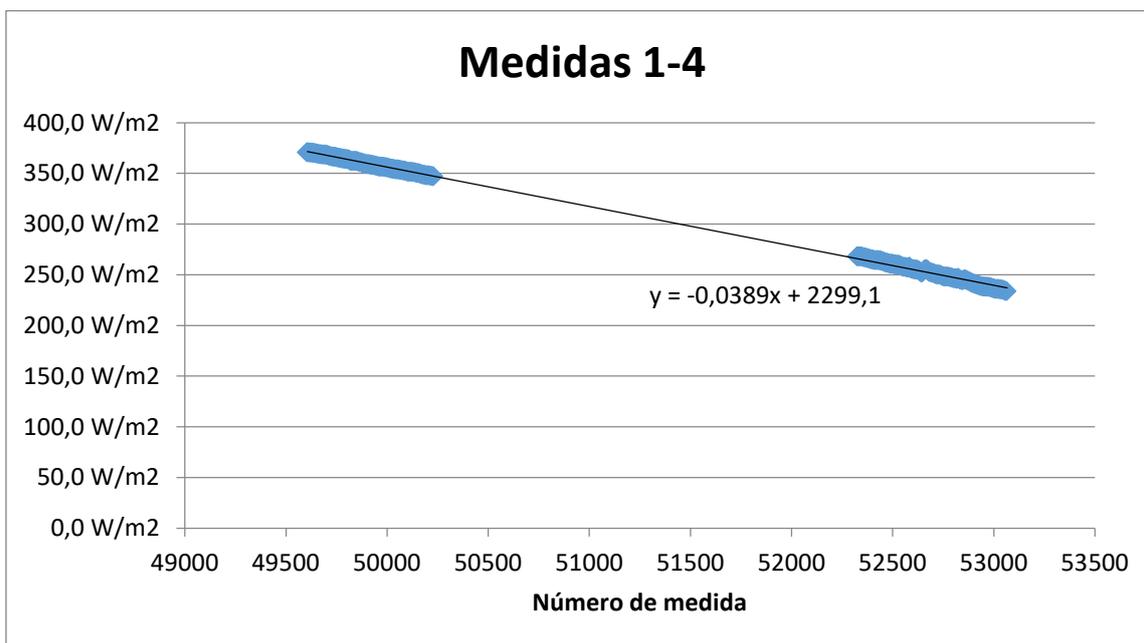


Figura I.75 Medidas 1-4

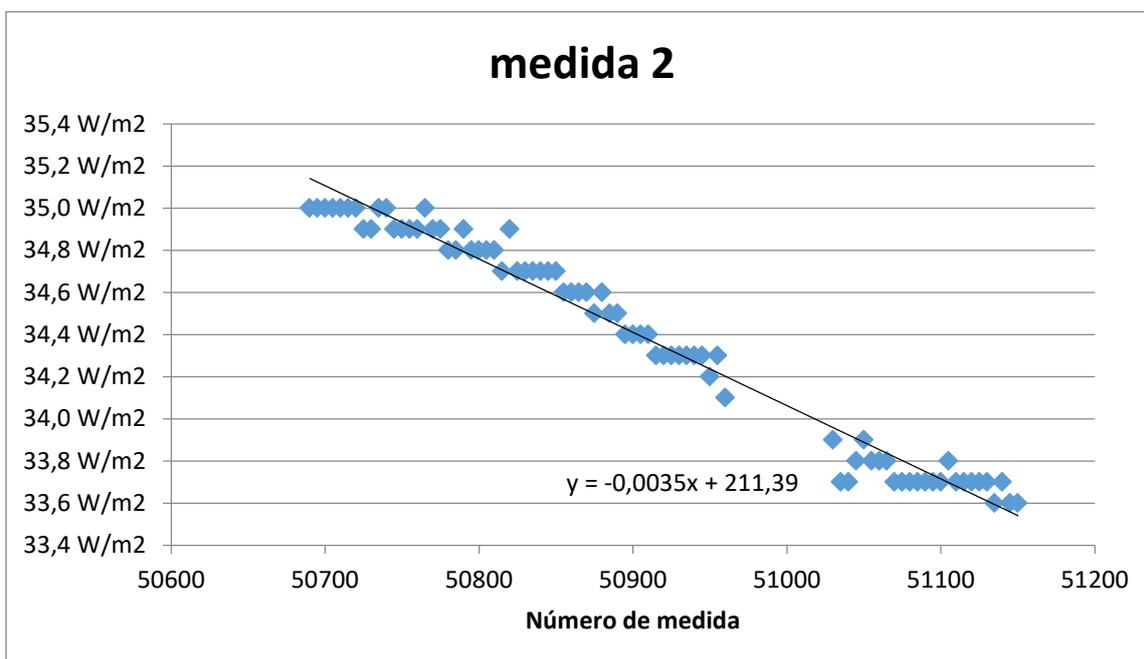


Figura I.76 medida 2

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

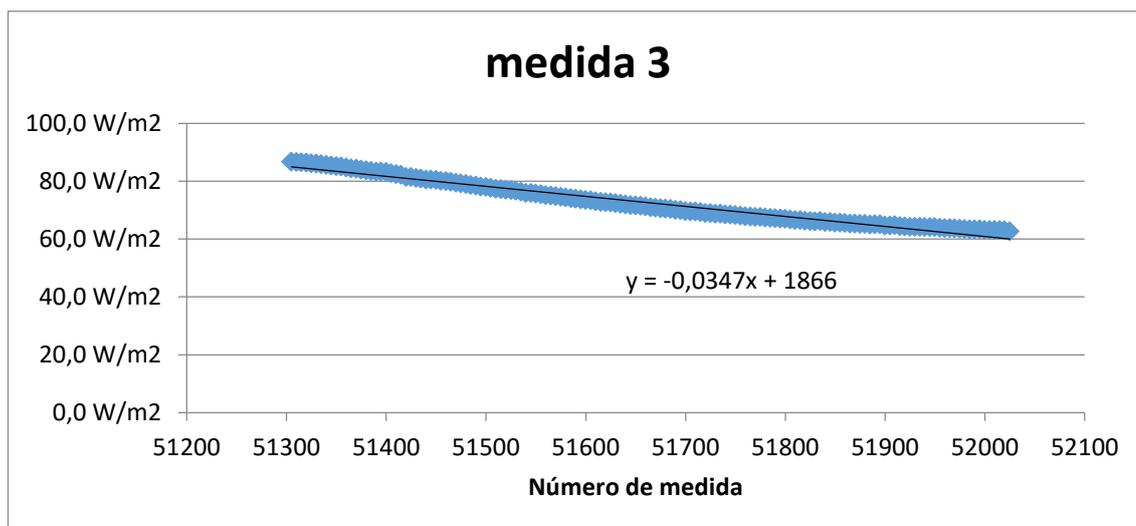


Figura I.77 medida 3

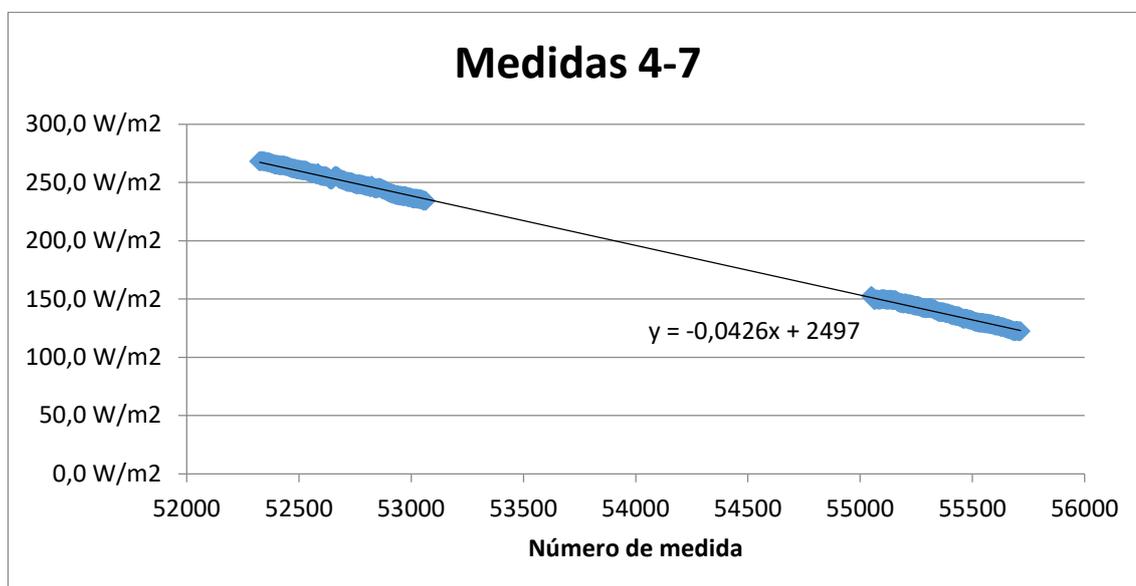


Figura I.78 Medidas 4-7

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

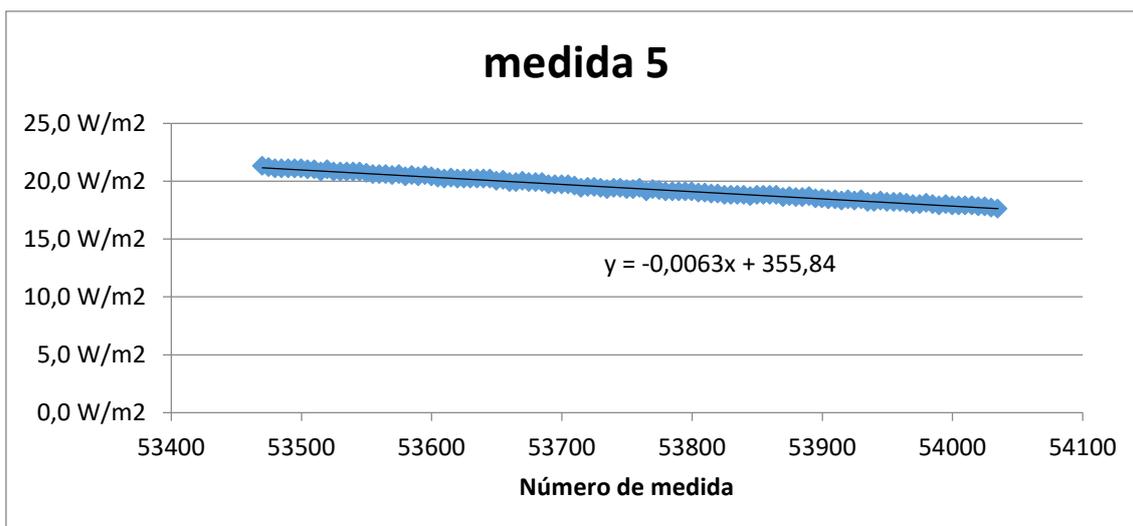


Figura I.79 medida 5

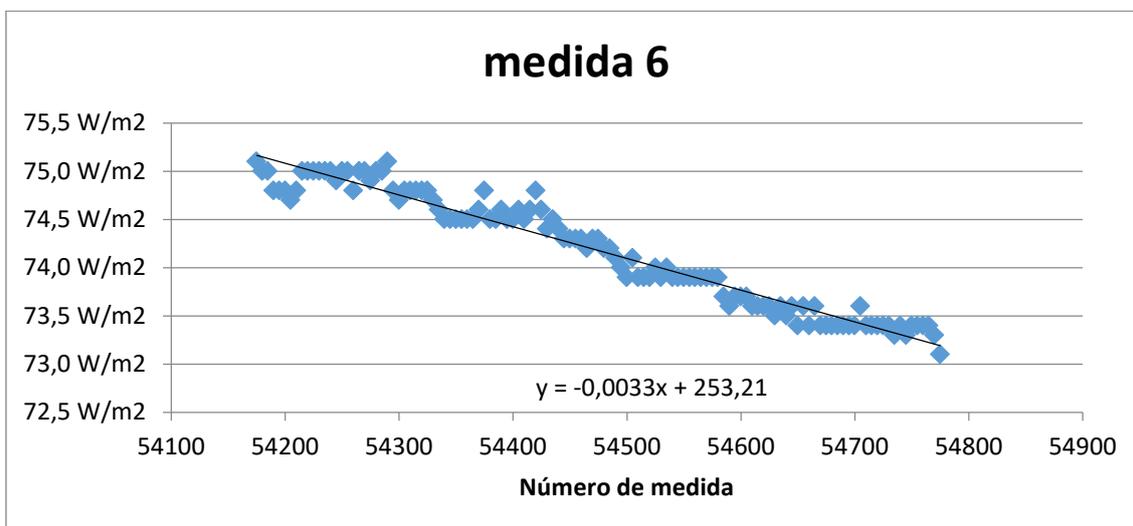


Figura I.80 medida 6

Los coeficientes de las medidas se muestran a continuación:

Tabla II.30 Coeficientes m y n de cada sonda

Coeficientes	Medida					
	1-4	2	3	4-7	5	6
m	-0,0389	-0,0035	-0,0347	-0,0426	-0,0063	-0,0033
n	2299	211	1866	2497	355	253

A partir de las rectas de radiación se pueden obtener las transmitividades dividiendo la radiación antes del cerramiento entre la radiación después del cerramiento.

Las graficas de transmitividades obtenidas son las siguientes:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

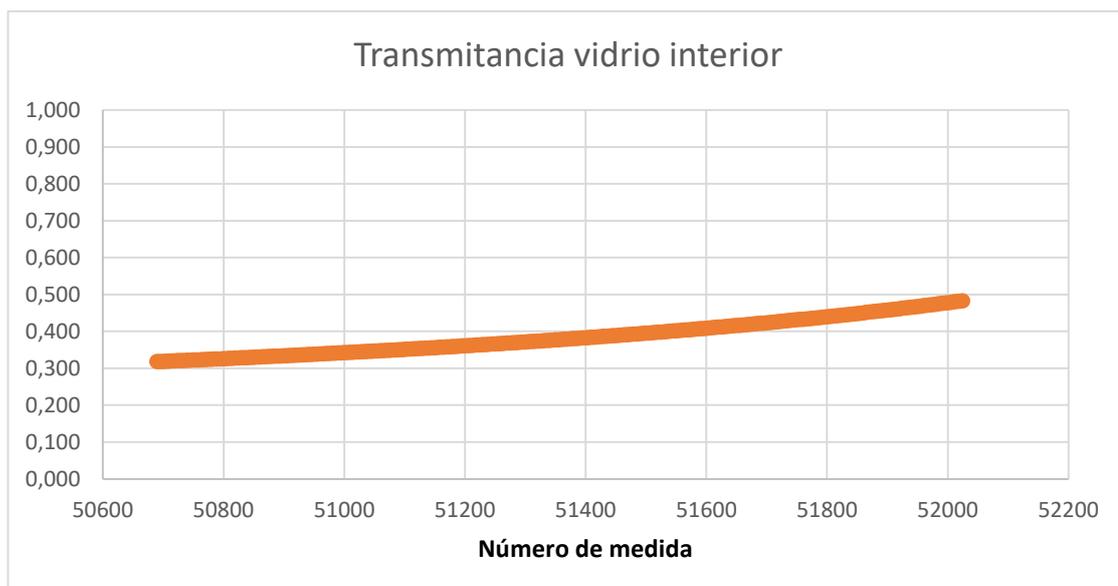


Figura I.81 Transmitancia vidrio interior

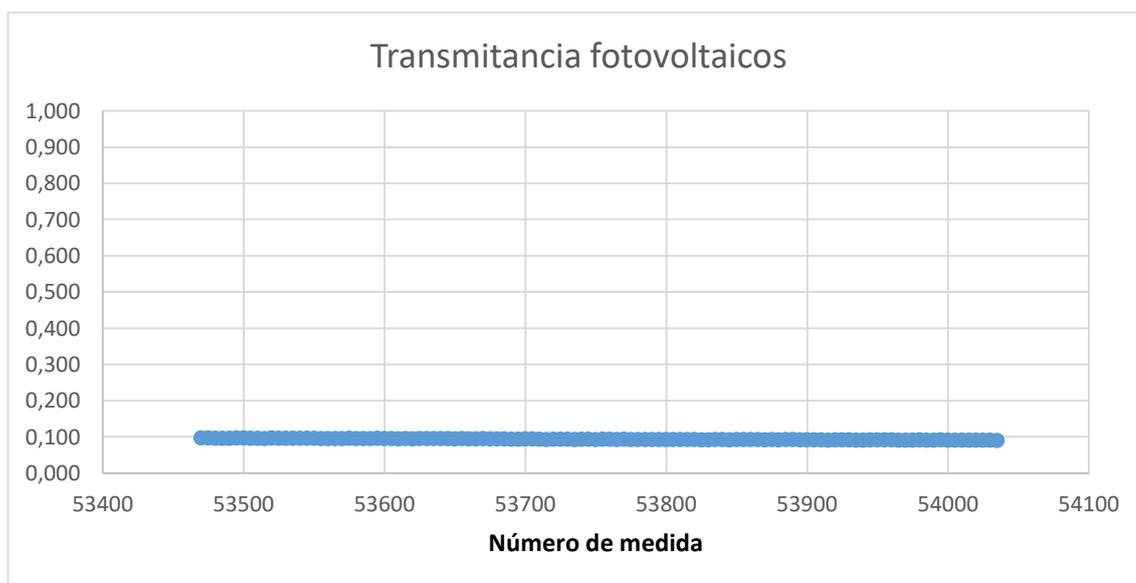


Figura I.82 Transmitancia fotovoltaicos

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

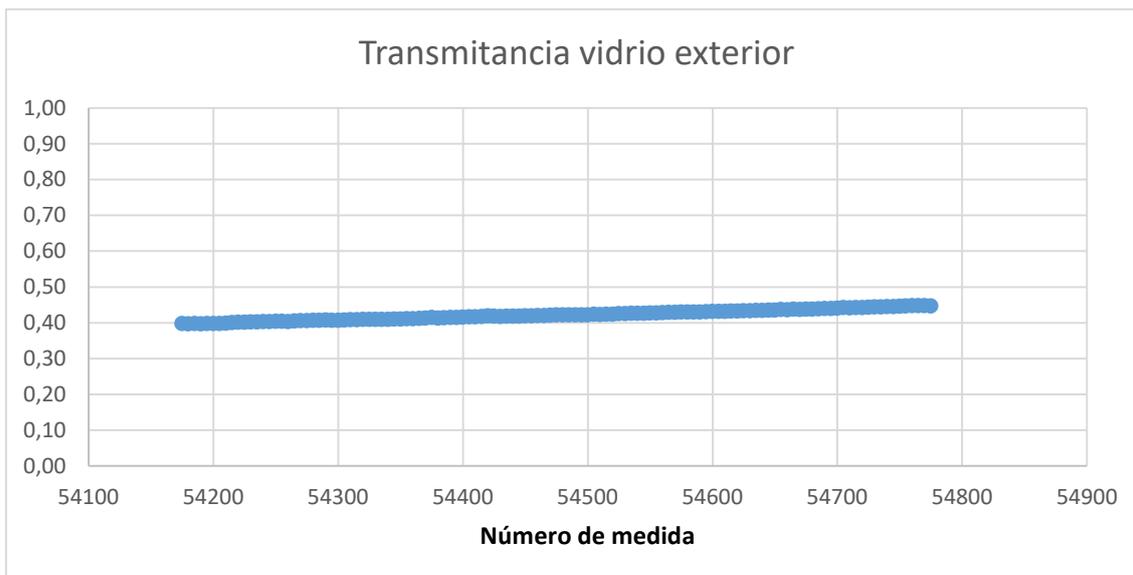


Figura I.83 Transmitancia vidrio exterior

Mención especial merece el cálculo de la transmitividad de la pared formada por el vidrio exterior con los paneles fotovoltaicos. Ésta se puede obtener por dos vías distintas: ponderando las transmitividades o mediante el cociente de la radiación antes del cerramiento entre la radiación después del cerramiento. Ambos métodos serán aplicados.

Empezando por el cálculo como el cociente:

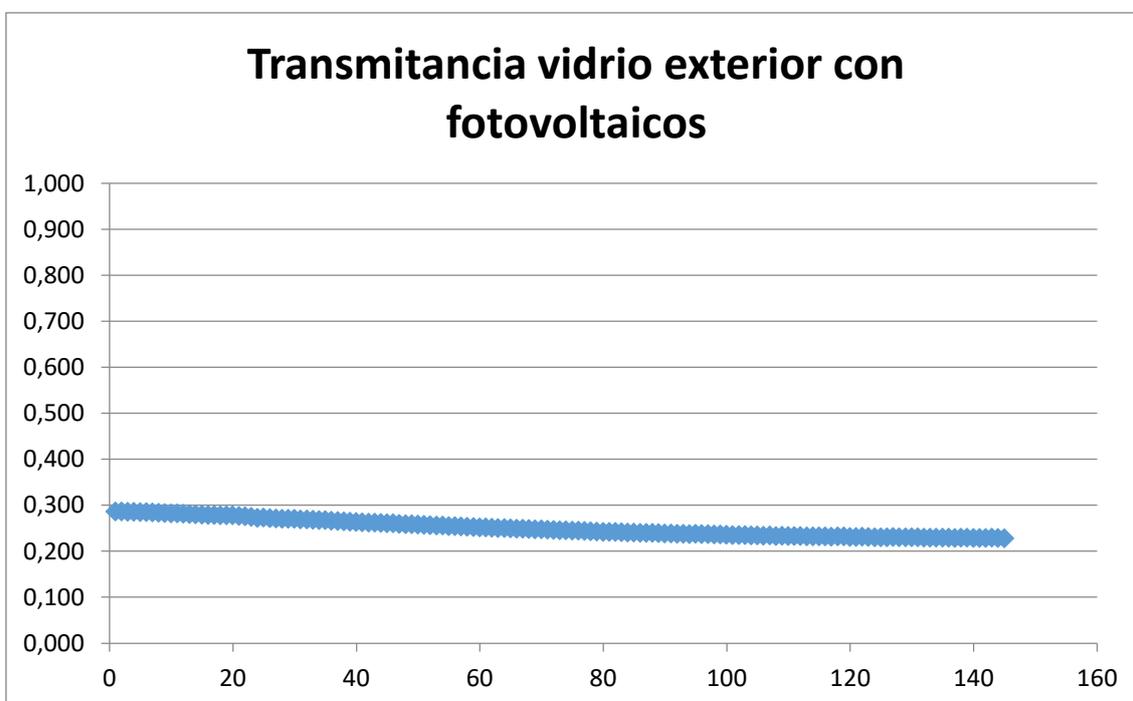


Figura I.84 Transmitancia vidrio exterior con fotovoltaicos

Ponderando:

$$\tau_p = \frac{\tau_2 * A_2 + \tau_3 * A_3}{A_2 + A_3} \quad (E-II.7)$$

Donde se comprueba que mediante ambos métodos se obtienen valores muy similares.

Los valores de transmitividad obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

**Tabla II.31 Transmitividades**

Superficie	Transmitividad
Panel fotovoltaico	0.094
Vidrio exterior	0.42
Vidrio interior	0.37
Vidrio exterior + fotovoltaico	0.25

## Medidas de absortividad

---

Las últimas medidas realizadas en la doble piel tienen como objetivo el poder caracterizar la doble piel. Entre las características que es necesario conocer se encuentra la absortividad, que representa la cantidad de radiación que absorbe un cuerpo sin ser transmitida o reflejada.

Para llevar a cabo las medidas de absortividad se utilizarán dos equipos la termocámara y el medidor de temperatura superficial.

La termocámara es un medidor de radiación. Su funcionamiento es el siguiente: la termocámara detecta la radiación incidente, a partir de un software interno y de la emisividad que previamente se haya definido, calcula la temperatura de las superficies y superpone este valor a una imagen digital. Finalmente, se obtiene una imagen de la temperatura de las superficies que captura. A esta imagen se la conoce como termografía.



Figura I.85 Ejemplo de una termografía

Si bien éste es el proceso usual de cálculo, en el estudio de la doble piel la emisividad de la superficie (que coincide con la absorptividad) es precisamente la incógnita. Por otro lado, se puede conocer la temperatura de los cerramientos mediante el medidor de temperatura superficial.

Lo que se realizó fue suponer un valor de la emisividad de los cerramientos. Después, se midió la temperatura con la termocámara y el sensor de temperatura de superficie y se compararon los valores. Si los valores de temperatura coincidían, se daba por bueno el valor de la emisividad. Si por el contrario estos valores diferían, se cambiaba el valor de la emisividad y se repetía el proceso.

Este fue el procedimiento seguido para el cálculo de la absorptividad del hormigón. El hormigón se trata de un material opaco. Estos materiales no transmiten la luz (o absorben la radiación o la reflejan). Sin embargo, al

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

intentar aplicar este procedimiento a materiales como el vidrio o los paneles fotovoltaicos parte de la radiación captada por la termocámara se corresponde con la luz que atraviesa a los materiales, desvirtuando la medida.

Al no poderse realizar el mismo procedimiento para el cálculo de la absorptividad del vidrio ni de los fotovoltaicos, se recurrió a realizar dos hipótesis sobre los mismos. Se considerará que los vidrios reflejan toda la radiación que no traspasa los mismos, siendo su absorptividad nula. Por el contrario, se considerará que los fotovoltaicos absorben toda la radiación que no traspasa los mismos, siendo su absorptividad la unidad menos el valor de la transmitancia.

A continuación se muestran las absorptividades de los materiales.

Tabla II.32 Absorptividades

Material	Absorptividad, $\alpha_i$
Fotovoltaicos	0.91
Vidrio	0
Hormigón	0.94

Es importante destacar que a la hora de realizar un balance térmico hay que descontar de el valor de la absorptividad el porcentaje de energía que se transforma en electricidad en el fotovoltaico (rendimiento del panel fotovoltaico), ya que esta energía no se transforma en calor. De este modo:

$$\alpha_{\text{térmico}} = \alpha_{\text{fotovoltaicos}} - \% \quad (\text{E-II.8})$$

Donde  $\alpha_{\text{fotovoltaicos}}$  representa la absorptividad real de los paneles,  $\alpha_{\text{térmico}}$  representa la parte de la energía que se transformará en energía térmica en los paneles y % representa el rendimiento del fotovoltaico.

Los datos utilizados para realizar los balances térmicos (con un rendimiento del panel de un 15%) serán:

Tabla II.33 Absorptividades para los balances térmicos

Material	Absorptividad, $\alpha_i$
Fotovoltaicos	0.76
Vidrio	0
Hormigón	0.94

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

---

### Fuentes bibliográficas

---

- [1] “Software para data loggers”. Testo. 2016.
- [2] “Operating instructions ALMEMO”. Ahlborn. 2005
- [3] Alonso, J. TFG. “Análisis de la acumulación térmica en la estructura de un edificio”. Universidad de Valladolid. Valladolid, 2016.
- [4] “Última generación de sondas de temperatura y humedad relativa”. Geonica.

---

### Referencias en páginas web

---

- [W1] Testo. Sensor de temperatura. <https://www.testo.org/es/home/products/productdetailpage.jsp?productNo=0572+1754> . Última consulta 19/02/2017.
- [W2] Testo. Sensor de temperatura. <https://www.testo.com/es-ES/Par%C3%A1metro/Temperatura/Temperatura--inmersi%C3%B3n-y-penetraci%C3%B3n/testo-175-T2/p/0572%201752>. Última consulta 19/02/2017.
- [W3] Testo. Sonda de temperatura con punta de penetración. <https://www.testo.com/es-ES/Par%C3%A1metro/Temperatura/Temperatura--inmersi%C3%B3n-y-penetraci%C3%B3n/Sonda-de-temperatura-con-punta-de-penetraci%C3%B3n-%28NTC%29-/p/0572%201001>. Última consulta 19/02/2017.
- [W4] Kayteck instruments. Piranómetro. [http://www.kayteck.com/english/star\\_pyranometer.htm](http://www.kayteck.com/english/star_pyranometer.htm). Última consulta 20/02/2017.
- [W5] Hukseflux. Piranómetro. <http://www.hukseflux.com/product/sr20-pyranometer>. Última consulta 20/02/2017.
- [W6] Flir. Termocámara. <http://www.flir.com/legacy/view/?id=52336>. Última consulta 19/02/2017.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

- [W7] Testo. Medidor multifunción. <https://www.testo.com/es-ES/Par%C3%A1metro/CO%E2%82%82-CO-Luz-Sonido/Calidad-del-aire-interior--CO-ambiente/testo-435-2/p/0563%204352>. Última consulta 20/02/2017.
- [W8] Testo. Sonda de temperatura de superficie. <https://www.testo.com/es-ES/Aplicaciones/Operaciones%2C-mantenimiento-y-servicio/Sistemas-de-calefacti%C3%B3n/Sistemas-de-calefacti%C3%B3n-->. Última consulta 21/02/2017.
- [W9] Fluke. Horno de calibración. <http://www.fluke.com/fluke/eses/calibradores-de-procesos/calibradores-de-temperatura/fcal-9103--9140--9141-field-dry-well.htm?pid=71670>. Última consulta 20/02/2017.

---

## TABLAS

---

Tabla II.1 Objetivos de cada medida.....	83
Tabla II.2 Especificaciones del piranómetro.....	88
Tabla II.3 Sensores de la estación meteorológica .....	90
Tabla II.4 Sensores utilizados.....	91
Tabla II.5 Características del sensor .....	91
Tabla II.6 Características del piranómetro.....	92
Tabla II.7 Características del horno de calibración.....	97
Tabla II.8 Coeficientes m y n de cada sonda.....	105
Tabla II.9 Puntos de corte de cada sonda .....	114
Tabla II.10 Coeficiente m y n de la sonda interna.....	114
Tabla II.11 Objetivos de cada medida.....	116
Tabla II.12 Disposición de sondas en el edificio Lucía .....	117
Tabla II.13 Medidas en el Lucía .....	128
Tabla II.14 Coeficientes m y n de cada sonda .....	134
Tabla II.15 Transmitividades .....	137
Tabla II.16 Absortividades .....	139
Tabla II.17 Absortividades para los balances térmicos .....	139

---

## FIGURAS

---

Figura I.1 testo 175 H1 .....	84
Figura I.2 testo 175 T2 .....	85
Figura I.3 Sonda de temperatura (NTC).....	86
Figura I.4 Interfaz de usuario .....	87
Figura I.5 Piranómetro .....	88
Figura I.6 Sistema de Adquisición de Datos del piranómetro .....	89
Figura I.7 Sensor de T/H del aire .....	91
Figura I.8 Piranómetro .....	92
Figura I.9 Termocámara .....	93
Figura I.10 Medidor multifunción.....	94
Figura I.11 Sonda de temperatura de superficie.....	95
Figura I.12 Cámara térmica .....	96
Figura I.13 Horno de calibración.....	97
Figura I.14 Horno de calibración.....	98
Figura I.15 sonda de temperatura .....	99
Figura I.16 Temperatura del sensor .....	100
Figura I.17 Temperatura de la sonda frente a la temperatura real .....	101
Figura I.18 Medidas a temperatura ambiente.....	101
Figura I.19 diferencia de temperatura .....	102
Figura I.20 Temperatura corregida .....	102
Figura I.21 Temperatura en cámara térmica .....	103
Figura I.22 Diferencias de T <sup>a</sup> .....	104
Figura I.23 Temperatura interna.....	105
Figura I.24 Sondas en el exterior .....	106
Figura I.25 Temperatura en el exterior.....	106
Figura I.26 Diferencias de temperaturas en el exterior .....	107
Figura I.27 Diferencia de temperaturas sin ralentización y corregido el error estacionario.....	108
Figura I.28 Diferencia de temperaturas con ralentización de 5 minutos y corregido el error estacionario .....	109
Figura I.29 Diferencia de temperaturas con ralentización de 10 minutos y corregido el error estacionario .....	110
Figura I.30 Diferencia de temperaturas con ralentización de 15 minutos y corregido el error estacionario .....	111
Figura I.31 Diferencia de temperaturas con ralentización de 20 minutos y corregido el error estacionario .....	112
Figura I.32 Sonda en la doble piel .....	118
Figura I.33 Temperatura de las sondas corregidas.....	119

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Figura I.34 Temperatura de las sondas en la cámara.....	120
Figura I.35 Temperatura de las sondas interiores.....	121
Figura I.36 Temperaturas en el interior.....	122
Figura I.37 Colocación de las sondas en el interior del edificio.....	123
Figura I.38 Temperatura de la sonda externa.....	124
Figura I.39 Temperaturas en el exterior.....	125
Figura I.40 Colocación de la sonda en el exterior.....	126
Figura I.41 Radiación sobre sup horizontal.....	127
Figura I.42 Imagen de día de la toma de medidas de radiación.....	129
Figura I.43 Piranómetro con la estructura.....	130
Figura I.44 Radiación detrás del fotovoltaico.....	131
Figura I.45 Medidas 1-4.....	132
Figura I.46 medida 2.....	132
Figura I.47 medida 3.....	133
Figura I.48 Medidas 4-7.....	133
Figura I.49 medida 5.....	134
Figura I.50 medida 6.....	134
Figura I.51 Transmitancia vidrio interior.....	135
Figura I.52 Transmitancia fotovoltaicos.....	135
Figura I.53 Transmitancia vidrio exterior.....	136
Figura I.54 Transmitancia vidrio exterior con fotovoltaicos.....	136
Figura I.55 Ejemplo de una termografía.....	138

---

## CAPÍTULO III: MODELO MATEMÁTICO Y DE COMPORTAMIENTO

---

### ÍNDICE CAPÍTULO III

<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.....</b>	<b>147</b>
1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS DE TRANSFERENCIA .....	147
1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR .....	148
1.3. ECUACIONES UTILIZADAS .....	169
1.4. RADIACIÓN INCIDENTE .....	171
<b>2. ECUACIONES Y BALANCES EN LA DOBLE PIEL.....</b>	<b>176</b>
2.1. DIVISIÓN DE LA DOBLE PIEL .....	176
2.2. RADIACIÓN INCIDENTE .....	181
2.3. BALANCES DE ENERGÍA .....	185
<b>3. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>197</b>
3.1. HIPÓTESIS DE TEMPERATURA .....	197
3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	199
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>201</b>
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	201
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB .....	201
<b>TABLAS.....</b>	<b>202</b>
<b>FIGURAS.....</b>	<b>203</b>

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

---

# 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

---

## 1.1. Descripción general de los procesos de transferencia

---

El objetivo de este capítulo es mostrar las ecuaciones que rigen la transferencia de calor y de masa para poder aplicarlas al estudio de la doble piel del edificio Lucía.

Primero se introducirán cuáles son los fenómenos y procedimientos de transferencia que sufre la materia.

La materia y por tanto la materia fluida tiende siempre al equilibrio. Este equilibrio en un campo fluido conlleva uniformidad espacial de las magnitudes fluidas [1]. Estas magnitudes fluidas consideradas son:

- **La masa o composición:** La materia está formada por átomos y moléculas de distinta naturaleza. La composición de los campos fluidos o dicho de otra manera la proporción de materia de cada tipo que se encuentra en ellos, tiende a homogeneizarse.
- **La temperatura:** Un mayor o menor valor de la temperatura representa una mayor o menor vibración molecular, la cual tiende al equilibrio dentro de un campo fluido.
- **La velocidad o cantidad de movimiento:** La velocidad media de las partículas, también tiende al equilibrio unificándose.

A su vez, estas magnitudes pueden transferirse de una masa fluida a otra por tres vías diferentes:

- **Difusión:** Es un fenómeno de carácter molecular, debido a un gradiente de una de las magnitudes fluidas. Así sin necesidad de un movimiento macroscópico del campo fluido, por diferencia de magnitudes se realiza un intercambio a nivel molecular. Por ejemplo al poner en contacto dos superficies con distinta temperatura, ambas temperaturas tienden a una misma intermedia entre ambas.
- **Convección:** Es un fenómeno que necesita un movimiento a nivel macroscópico de la corriente fluida. Este se superpone con el difusivo, pero tiene una importancia mucho mayor si se dan a la vez. La corriente de fluido, en su movimiento lleva zonas de diferentes magnitudes fluidas, mezclándolas para llegar al equilibrio.

- **Transporte turbulento:** Este fenómeno tiene características de los dos anteriores. Se produce con un movimiento de una corriente fluida por lo que podría ser considerado un fenómeno convectivo. Sin embargo las propiedades son intercambiadas a nivel molecular como en el transporte difusivo. Como su propio nombre indica, para que se lleve a cabo es necesario un régimen turbulento.

## 1.2. Transferencia de calor

---

El primer fenómeno que se va a tratar es la transferencia de calor, entendido esta como la forma de transferencia de la magnitud temperatura.

El calor es un modo de energía en tránsito, intercambiada y no almacenada. Se refiere a toda variación de energía en un sistema que no puede expresarse en función de un trabajo observable y es consecuencia siempre de una diferencia de temperaturas [2]. Consiste en un intercambio de energía interna de un sistema a otro.

El calor tiene tres mecanismos de transmisión:

1. Conducción
2. Convección
3. Radiación

Sea cual sea el mecanismo de transferencia de calor, se puede definir el calor intercambiado como calor sensible o calor latente.

**Calor sensible:** aquel que recibe o aporta un cuerpo y que provoca en el únicamente una variación en la temperatura, no afectando a la estructura molecular y por tanto a su estado. El valor del mismo se ha comprobado experimentalmente que corresponde al valor de la masa multiplicado por el calor específico y la diferencia de temperaturas experimentada [3].

$$Q_s = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{E-II.9})$$

**Calor latente:** aquel que interviene en el cambio de fase de una sustancia, el cual se realiza a temperatura constante. Puede expresarse como el producto de la masa por un factor  $\lambda$  que equivale lógicamente al calor latente específico.

$$Q_l = m \cdot \lambda \quad (\text{E-II.10})$$

## Transferencia de calor por conducción:

---

El primer fenómeno de transferencia de calor que se va a explicar es la convección. Este fenómeno corresponde con el transporte difusivo de la magnitud temperatura y por tanto se realiza por gradiente del mismo. Se define como:

*“Mecanismo de transferencia de energía interna entre dos cuerpos, o dos partes de un cuerpo, que tiene lugar mediante intercambio de energía cinética entra las partículas que lo constituyen, sean moléculas, átomos, iones o electrones libres, producido por el contacto directo entre ellas” [4].*

Es un fenómeno característico de la materia sólida aunque también se da en la materia fluida (líquidos y gases). Viene regido por la ecuación general de la conducción y por la ley de Fourier:

### *Ecuación General de la conducción en coordenadas cartesianas:*

Expresa como varía el campo de temperaturas por conducción.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{E-II.11})$$

Donde las conductividades según las direcciones cartesianas  $k_x = k_y = k_z = k$  si el material es homogéneo.

### *Ley de Fourier:*

Expresa como es el flujo de calor por conducción.

$$\vec{q} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{E-II.12})$$

### *Deducción de la ecuación general de la conducción:*

La ecuación general de la conducción se puede deducir realizando un balance de energía a un cubo diferencial de materia (figura III.1).

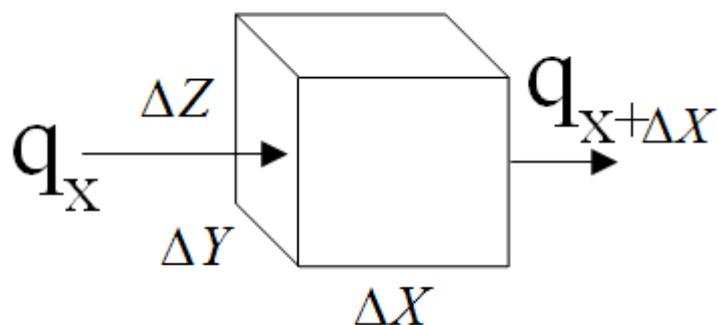
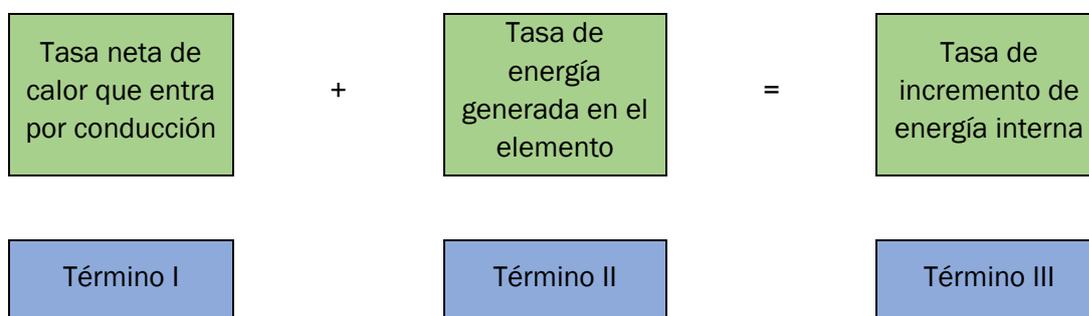


Figura III.86 Cubo diferencial de materia en coordenadas cartesianas

El balance se puede expresar de la siguiente forma:



Para poder ser deducida es necesario formular una serie de hipótesis:

1. La distribución de temperaturas es homogénea.
2. Se considera un cuerpo isótropo por lo que la conductividad junto con el resto de propiedades no varían en función de la dirección.
3. No hay cambios de fase ni movimientos de partículas a escala macroscópica (Fenómenos de convección).
4. No existen variaciones de volumen por efecto de la temperatura.

**Término I:**

Calculando el término I para la dirección x (figura III.2) y realizando una serie de Taylor:

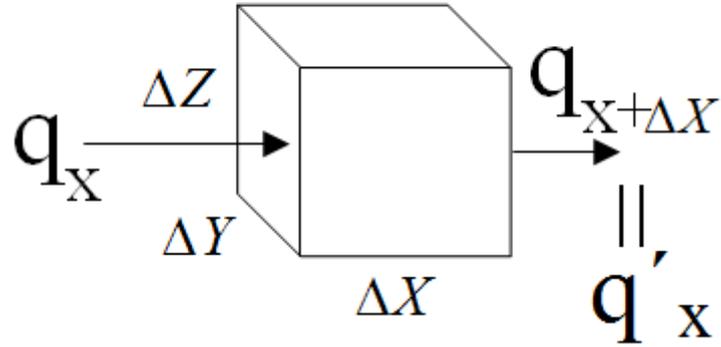


Figura III.87 Flujo de calor específico en dirección x

$$q'_{x+\Delta x} = q_x + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \cdot \Delta x + \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2}\right) \cdot \frac{\Delta x}{2!} + \left(\frac{\partial^3 q_x}{\partial x^3}\right) \cdot \frac{\Delta x}{3!} + \dots + \left(\frac{\partial^n q_x}{\partial x^n}\right) \cdot \frac{\Delta x}{n!} \quad (\text{E-II.13})$$

Calculando la tasa neta de calor que es igual al flujo entrante menos el saliente:

$$q_x - q'_{x+\Delta x} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \cdot \Delta x - \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2}\right) \cdot \frac{\Delta x}{2!} - \left(\frac{\partial^3 q_x}{\partial x^3}\right) \cdot \frac{\Delta x}{3!} - \dots - \left(\frac{\partial^n q_x}{\partial x^n}\right) \cdot \frac{\Delta x}{n!} \quad (\text{E-II.14})$$

Si se desprecian los términos de orden superior:

$$q_x - q'_{x+\Delta x} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \cdot \Delta x \quad (\text{E-II.15})$$

Multiplicando la tasa neta por el área transversal calculamos el flujo de calor:

$$\partial Q_x = (q_x - q'_{x+\Delta x}) \cdot \Delta x \Delta y \Delta z = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{E-II.16})$$

Considerando la ecuación de Fourier:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

$$\partial Q_x = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \cdot \Delta x \Delta y \Delta z = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial T}{\partial x}\right) \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{E-II.17})$$

Realizando el mismo procedimiento en las tres direcciones y utilizando el operador gradiente:

$$\partial Q_I = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) \right] \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{E-II.18})$$

**Término II:**

Representando por  $g$  la generación de energía en un elemento diferencial por unidad de tiempo (figura V.2.3):

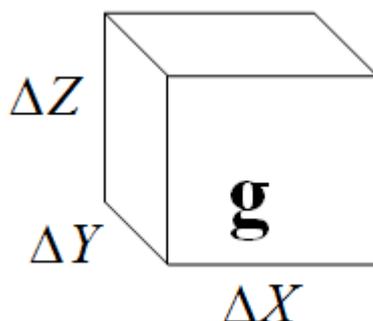


Figura III.88 eración de energía por unidad de volumen y tiempo

$$\partial Q_{II} = g \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{E-II.19})$$

**Término III:**

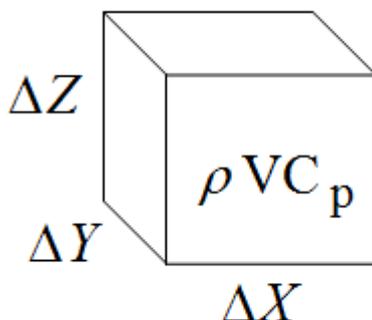


Figura III.89 Representación de la capacidad calorífica de un elemento diferencial

Teniendo en cuenta que se ha hecho la hipótesis de no existencia de cambio de fase, toda la energía interna acumulada se deberá a un intercambio de calor sensible.

Calculando la energía acumulada en un intervalo diferencial de tiempo

$$\partial Q_{III} = \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{E-II.20})$$

Debido al balance realizado:

$$\partial Q_I + \partial Q_{II} = \partial Q_{III} \quad (\text{E-II.21})$$

Sustituyendo por sus valores calculados anteriormente, se obtiene la ecuación general de la conducción:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{E-II.22})$$

Esta ecuación puede ser expresada y resuelta en todo tipo de sistemas de coordenadas imponiendo una serie de condiciones de contorno. La resolución de la ecuación general de la conducción nos dará la variación espacio temporal del campo de temperaturas de un sistema mientras que la deducción de la ley de Fourier nos dará el valor, la dirección y el sentido del flujo de calor por el mismo sistema.

#### *Difusividad térmica:*

Cabe resaltar la definición de la difusividad térmica. Esta propiedad, caracteriza el transporte de calor por conducción y tiene su analogía másica y de cantidad de movimiento. Se define como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (\text{E-II.23})$$

Siendo:

k la conductividad térmica.

$\rho$  la densidad de la sustancia.

$C_p$  el poder calorífico de la misma.

Todos los fenómenos de transporte por difusión se caracterizan por inducir un flujo que es provocado por una fuerza impulsora, un gradiente y son proporcionales a una propiedad fluida que representa el inverso de la resistencia ante este fenómeno de transporte. Tanto como para transporte de calor como de masa o de cantidad de movimiento, esta propiedad se denomina difusividad. En el caso particular de la transmisión de calor, la difusividad corresponde a la difusividad térmica  $\alpha$ .

## Transferencia de calor por convección

---

Se define como:

“Mecanismo de transmisión de calor que tiene lugar en el seno de un fluido, debido a los movimientos de masa del mismo” [4]. En realidad existe transmisión de calor entre partículas del fluido (conducción), pero la energía espacialmente se transporta por el movimiento del fluido.

Es un fenómeno característico de los fluidos y necesita de movimiento macroscópico del mismo. Según el mecanismo de convección se puede hablar de tres tipos:

- Convección natural: movimiento derivado de diferencias de densidad que a su vez están provocadas por diferencias de temperatura.
- Convección forzada: el movimiento se deriva de causas mecánicas externas.
- Convección por cambio de fase: Aquella en la que aparece un cambio de estado.

La convección, al deberse a un movimiento de materia, correlaciona el transporte de energía con el de masa. En cuanto a la transmisión de calor por convección, esta se rige por la ley de enfriamiento de Newton:

### *Ley de enfriamiento de Newton*

$$q = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (\text{E-II.24})$$

El fenómeno de transmisión por convección es más complejo que el de conducción y no se ha encontrado una solución analítica concreta. Para su estudio se recurre a correlaciones que pretenden resolver las ecuaciones diferenciales que resultan de su análisis y que a través de la adimensionalización y de estudios experimentales han podido corroborarse y se toman como fiables.  $T_s$  corresponde a la temperatura superficial y  $T_\infty$  a la temperatura de flujo desarrollado, lejos de la capa límite.

### Concepto de capa límite

La capa límite es un término que no solo se limita a la transmisión de calor sino también al transporte de cantidad de movimiento y de masa. Es una zona del espacio próximo a la superficie de un objeto en la cual se debe cumplir el equilibrio con esta misma superficie, teniendo nula velocidad y una temperatura igual a la de la superficie. De este modo, no pueden ser despreciados los efectos viscosos de la corriente fluida, generándose un gradiente pronunciado en un pequeño lugar del espacio, entre la superficie del sólido y el flujo alejado de la misma.

En el caso de la capa límite térmica que es la que nos interesa en este apartado, al existir este gran gradiente, parece una notable transferencia de calor [4].

Esta capa límite se representa a continuación:

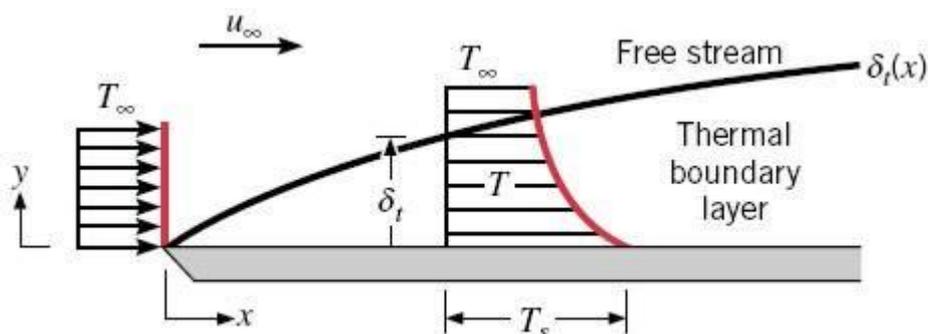


Figura III.90 Capa límite térmica y gradiente generado

Como se ha dicho la capa límite no se limita a la transmisión de calor sino que también existe una capa límite dinámica, encargada del transporte de cantidad de movimiento. Al estar acoplados los fenómenos de transferencia de calor, masa y cantidad de movimiento, esta tiene una importancia relevante en el estudio de la trasmisión de calor (figura III.6).

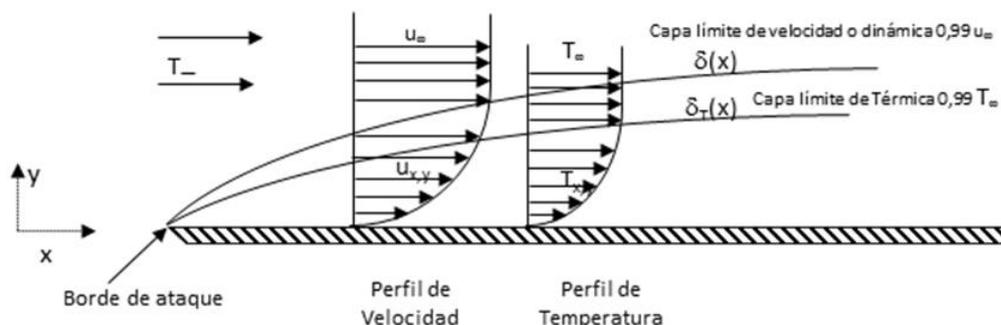


Figura III.91 Capa límite dinámica superpuesta con capa límite térmica

La capa límite dinámica puede distinguirse en función de la naturaleza del flujo en tres tipos (figura III.7).

- **Laminar:** Existe un flujo guiado y ordenado donde prevalecen los efectos viscosos.
- **Turbulenta:** El flujo es desordenado y abrupto. Se pueden distinguir tres zonas en ella:
  - Subcapa laminar o viscosa: Debido a que debe mantenerse el equilibrio con la superficie debe existir una subcapa dónde prevalezcan los esfuerzos viscosos.
  - Subcapa de transición o amortiguación: Zona de transición entre subcapas.
  - Subcapa turbulenta: Aquella donde se dan realmente los fenómenos de turbulencia.
- **Transición:** Zona intermedia de paso de flujo laminar a turbulento.

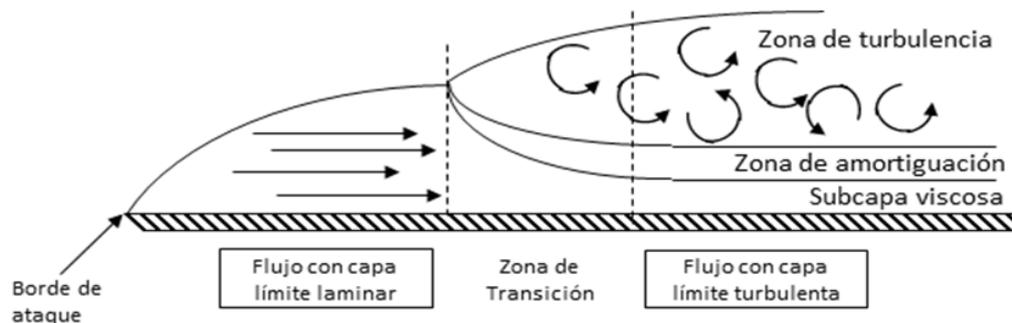


Figura III.92 Tipos de capa límite en función de la naturaleza del flujo.

El régimen en el que nos encontremos (laminar, turbulento, o de transición) es muy importante pues cambiarán los fenómenos de transmisión de calor y con ello el flujo de calor.

A pesar de aparente sencillez de la ley de enfriamiento de Newton, el cálculo del coeficiente de película  $h$  presenta importantes dificultades que se expondrán en el siguiente apartado.

#### *Determinación del coeficiente de película $h$ .*

El coeficiente de película no es una propiedad del fluido sino una característica del proceso. Por ello la obtención del mismo no es inmediata [4]. Este coeficiente depende de:

- Fluido: De la naturaleza y el estado del mismo.
- Superficie: De la geometría y la naturaleza de la misma.
- Flujo: De la geometría y la naturaleza del mismo.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Al depender del flujo, para resolver el problema térmico, debemos antes resolver el campo fluido en su aspecto mecánico, esto es su distribución de velocidades. Además, en muchos casos se trabajará con fluidos compresibles dónde el problema térmico y el mecánico no podrán ser separados y deberán resolverse conjuntamente.

Por ello para resolver el problema de convección, que se resume en calcular el coeficiente de película para poder aplicar la ley de enfriamiento de Newton, ha de conocerse el campo fluido a la perfección. Esto se consigue planteando las siguientes ecuaciones de la mecánica de fluidos.

1. Conservación de la masa (continuidad).
2. Conservación de la cantidad de movimiento (en las tres direcciones).
3. Conservación de la energía.
4. Ecuaciones de estado.

Estas son todas las ecuaciones disponibles para poder determinar el campo fluido y con ello ser capaces de calcular el coeficiente de película  $h$ . Cada ecuación puede asociarse a una variable del campo fluido aunque todas están relacionadas por lo que dificulta mucho la resolución analítica, siendo posible su obtención únicamente para casos muy sencillos.

A continuación se presenta una tabla resumen asociando cada variable fluido a la ecuación o ley que se plantea para su obtención en un caso general. (Tabla V.2.1).

Tabla III.34 Resumen de variables y ecuaciones en el problema general

VARIABLE	ECUACIÓN
Velocidad ( $V_x, V_y, V_z$ )	3 Ec. Ley de conservación de la cantidad de movimiento, en 3 direcciones.
Densidad	1 Ec. Ley de conservación de la masa.
Presión	1 Ec. Ley de conservación de la energía
Temperatura	1 Ec. Ecuación de estado del fluido

Como vemos tendríamos que resolver 6 ecuaciones diferenciales para obtener solución analítica a las 6 variables del campo fluido que están relacionadas entre sí.

En el caso de tener fluidos incompresibles, la densidad de los mismos se considera constante y los problemas térmico y mecánico se consideran desacoplados, realizando más sencillo el estudio del campo fluido.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Además de considerar incompresible los fluidos, se van a realizar otras dos simplificaciones más. Resumiendo las tres simplificaciones que se consideraran en el análisis son:

1. Régimen estacionario.
2. Problema bidimensional.
3. Fluidos incompresibles.

Con esta simplificación conseguimos eliminar dos variables fluidas y además simplificar el análisis de las otras 4 quedando una tabla resumen de ecuaciones como sigue:

Tabla III.35 Resumen de variables y ecuaciones tras simplificaciones

VARIABLE	ECUACIÓN
Velocidad ( $V_x, V_y$ )	2 Ec. Ley de conservación de la cantidad de movimiento, en 2 direcciones.
Presión	1 Ec. Ley de conservación de la masa.
Temperatura	1 Ec. Ley de conservación de la energía.

*Ecuación de conservación de la masa*

Al tratarse de un proceso estacionario, la variación de masa con respecto al tiempo debe ser nula. Al considerar un problema bidimensional realizamos un balance de materia a un cubo diferencial obteniendo dos ecuaciones (figura V.2.8):

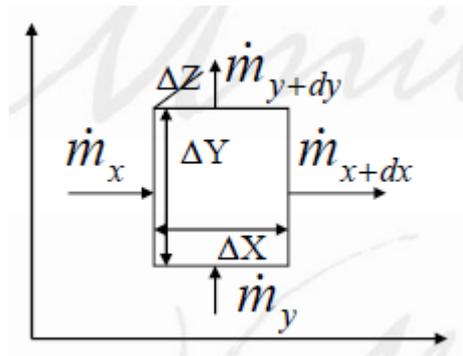


Figura III.93 Elemento diferencial para el balance de masa

Al tener que conservarse el flujo neto de materia a través de las dos direcciones X e Y debe ser nulo:

$$(\dot{m}_{x+dx} - \dot{m}_x) + (\dot{m}_{y+dy} - \dot{m}_y) = 0 \quad (E-II.25)$$

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Asimismo, el flujo másico puede expresarse como la densidad flujo volumétrico, que a su vez corresponde a la velocidad del fluido por el área transversal:

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = u \cdot S \cdot \rho \quad (\text{E-II.26})$$

Por lo que a área y densidad constante:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = S \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{E-II.27})$$

Sabiendo que:

$$\dot{m}_{x+dx} = \dot{m}_x + \frac{\partial \dot{m}_x}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (\text{E-II.28})$$

$$\dot{m}_{y+dy} = \dot{m}_y + \frac{\partial \dot{m}_y}{\partial y} \cdot \Delta y \quad (\text{E-II.29})$$

Sustituyendo las ecuaciones Ec II.20 y Ec II.21 en la ecuación Ec II.19:

$$\frac{\partial \dot{m}_x}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial \dot{m}_y}{\partial y} \cdot \Delta y = 0 \quad (\text{E-II.30})$$

Considerando las ecuaciones Ec II.20 y Ec II.21 y las áreas transversales correspondientes a los flujos en el cubo diferencial:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{m}_x}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial \dot{m}_y}{\partial y} \cdot \Delta y &= \rho \cdot (\Delta y \Delta z) \Delta x \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \cdot (\Delta x \Delta z) \Delta y \frac{\partial v}{\partial y} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{E-II.31})$$

Como la densidad no puede ser nula y el volumen diferencial tampoco llegamos a:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{E-II.32})$$

Siendo esta última ecuación (Ec II.24) la ecuación de continuidad en el caso bidimensional con densidad constante.

**Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:**

Estamos en un caso bidimensional con densidad constante. Por ello se plantearán dos ecuaciones una para cada componente de la velocidad.

Se parte de la 2ª Ley de Newton dónde el sumatorio de fuerzas en una dirección en un sistema es igual a la variación de cantidad de movimiento del sistema en esa dirección

$$\sum F_x = \frac{d(m \cdot v)}{dt} \quad (\text{E-II.33})$$

Según la mecánica de fluidos [1] tenemos dos tipos de fuerzas:

- Fuerzas sobre el cuerpo: Fuerzas de carácter volumétrico como por ejemplo la gravedad o las fuerzas electromagnéticas.
- Fuerzas superficiales: Fuerzas que solo actúan en la superficie en un cuerpo como la presión.

Realizando un desarrollo integral de las ecuaciones y más tarde deduciendo su forma diferencial [1], llegamos a las siguientes ecuaciones de conservación del movimiento en forma diferencial en un problema bidimensional, estacionario y con densidad constante.

En dirección x:

$$\rho \cdot \left( u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{E-II.34})$$

En dirección y:

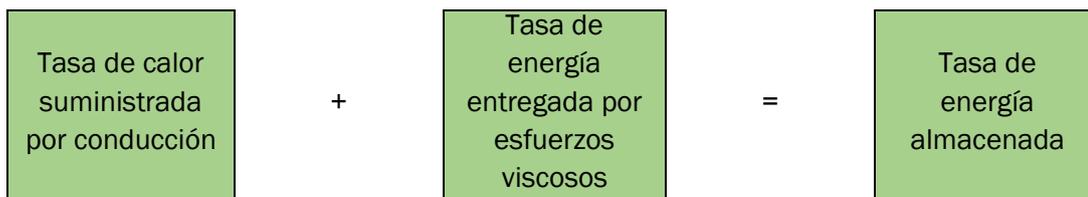
$$\rho \cdot \left( u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{E-II.35})$$

Como vemos al tener un problema con densidad constante, a partir de las ecuaciones Ec II.24, Ec II.26 y Ec II.27, podemos resolver las incógnitas de presión, velocidad en x y velocidad en y si conocemos las fuerzas externas que se aplican al sistema. Esto solo es posible por tener el fluido constante su densidad, lo que desacopla el problema mecánico del térmico.

**Ecuación de la energía:**

Una vez resuelto el problema mecánico en nuestro campo fluido, debemos resolver el problema térmico, es decir la distribución de temperaturas. Este se resuelve aplicando el primer principio de la termodinámica o principio de conservación de la energía.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Realizando este balance para un problema bidimensional, estacionario y con propiedades de la materia constantes se puede obtener la ecuación de la energía en forma diferencial:

$$\rho \cdot C_p \cdot \left( u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \cdot \left( u \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \phi \quad (\text{E-II.36})$$

Dividiendo ambos términos de la ecuación entre la capacidad térmica ( $\rho \cdot C_p$ ):

$$\left( u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \cdot \left( u \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\nu}{C_p} \phi \quad (\text{E-II.37})$$

Dónde el factor:

$$\frac{k}{\rho \cdot C_p} = \alpha \text{ se conoce como difusividad térmica}$$

Resumiendo las ecuaciones que han resultado del análisis para el caso bidimensional, estacionario, con propiedades uniformes y fluidos incompresibles tenemos la siguiente tabla de ecuaciones en coordenadas cartesianas:

Tabla III.36 Resumen de ecuaciones diferenciales del análisis del campo fluido

Nombre	Id	Ecuación
Ec. de continuidad	(E-II.38)	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$
Ec. de cantidad de movimiento en x	(E-II.39)	$\rho \cdot \left( u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$
Ec. de cantidad de movimiento en y	(E-II.40)	$\rho \cdot \left( u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$
Ec. de la energía	(E-II.41)	$\left( u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \cdot \left( u \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\nu}{C_p} \phi$

### *Resolución del problema y adimensionalización*

Este sistema de ecuaciones solo puede resolverse para casos sencillos, desacoplando el sistema de ecuaciones y calculando primero el problema mecánico con las 3 primeras. Para la resolución de problemas complejos se recurre a una combinación de la solución de estas ecuaciones para problemas simples con resultados experimentales.

Por medio de la adimensionalización de variables utilizando el Teorema de  $\pi$  de Buckingham:

*“Si existe una ecuación que relaciona  $n$  magnitudes, esta ecuación puede expresarse de modo equivalente por otra que relacione  $(n-k)$  grupos adimensionales de aquellas magnitudes, siendo  $k$  menor o igual que el número de dimensiones independientes existentes en las  $n$  magnitudes”.*

Explicado de una forma sencilla el procedimiento consiste en establecer una serie de números adimensionales con la combinación de magnitudes empleadas en un problema. Así el número mínimo de números adimensionales deberá ser el número de magnitudes o dimensiones independientes que existan. Los números adimensionales se obtendrán con cocientes y potencias de las magnitudes del problema.

En el caso general propuesto a resolver se cuenta con 4 ecuaciones y se tomarán los siguientes números adimensionales:

$$X = \frac{x}{L}; Y = \frac{y}{L}; U = \frac{u}{u_{\infty}}; V = \frac{v}{u_{\infty}}; \theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}; P = \frac{p}{\rho \cdot u_{\infty}^2}$$

Siendo:

L: Longitud característica del proceso.

$u_{\infty}$ : Velocidad de referencia (normalmente la del flujo desarrollado).

$T_0 - T_{\infty}$ : Diferencia de temperaturas de referencia (superficie y flujo desarrollado)

$$\frac{1}{2 \cdot \rho \cdot u_{\infty}^2}: \text{La carga dinámica.}$$

Además se van a definir una serie de números adimensionales útiles para el estudio, que relacionan los fenómenos involucrados en el transporte convectivo.

### **Numero de Reynolds (Re):**

Relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas y tiene la siguiente formulación:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \cdot u_{\infty} \cdot L}{\mu}$$

Este número permitió a Reynolds distinguir entre flujos laminares y turbulentos y se usa para tal fin en fenómenos de convección forzada.

#### **Numero de Grashof (Gr):**

Relaciona las fuerzas de empuje con las fuerzas viscosas y tiene la siguiente formulación:

$$Gr = \frac{\text{Fuerzas de empuje}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2}$$

Este número se utiliza para distinguir el estado de flujo, laminar o turbulento en convección natural.

#### **Numero de Prandtl (Pr):**

Relaciona los fenómenos de difusión de cantidad de movimiento con los de transmisión de calor por difusión. Se expresa como sigue:

$$Pr = \frac{\text{Difusión cantidad de movimiento}}{\text{Difusión de calor}} = \frac{\mu \cdot Cp}{k}$$

Mide el espesor relativo de la capa límite dinámica respecto de la térmica. Si el número es muy grande representa que puede transmitirse fácilmente movimiento por difusión sin aumento significativo de la temperatura. Si por el contrario es muy pequeño, quiere decir que la difusión de la temperatura es muy grande sin necesidad de albergar movimiento.

#### **Número de Eckert (Ec):**

Relaciona la temperatura dinámica debida al movimiento del fluido con la diferencia de temperaturas entre la superficie y el flujo desarrollado. Se representa como:

$$Ec = \frac{\text{Temperatura dinámica por movimiento}}{\text{Diferencia de temperaturas}} = \frac{u_{\infty}^2}{Cp \cdot (T_0 - T_{\infty})}$$

Es un número que suele considerarse pequeño pues el movimiento no genera una gran diferencia de la temperatura por sí mismo.

#### **Número de Nusselt (Nu):**

Relaciona el calor transmitido por convección y el transmitido por conducción en el fluido. Se representa utilizando siempre la conductividad del fluido:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

$$Nu = \frac{\text{Calor por convección}}{\text{Calor por conducción}} = \frac{h \cdot L}{k}$$

**Número de Stanton (St):**

Se define el número de Stanton como una relación existente entre los números de Nusselt, Reynolds y Prandtl.

$$St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{h}{\rho \cdot Cp \cdot u_{\infty}}$$

**Número de Rayleigh (Ra):**

Se define el número de Rayleigh como una relación entre los números de Grashof y Prandtl

$$Ra = GrPr = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 (T_s - T_{\infty})}{\nu \cdot \alpha}$$

Con la definición de las variables adimensionalizadas y los números adimensionales descritos, pueden transformarse las ecuaciones (Ec V.22; Ec V.24; Ec V.25; Ec V.27) y llevarlas al campo adimensional.

**Ecuación de continuidad:**

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (\text{E-II.42})$$

**Ecuaciones de cantidad de movimiento:**

$$U \cdot \frac{\partial U}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{E-II.43})$$

$$U \cdot \frac{\partial V}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{E-II.44})$$

**Ecuación de la energía:**

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

$$U \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{RePr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) + \frac{Ec}{Re} \left[ 2 \left( \frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 \right] \quad (E-II.45)$$

Utilizando las simplificaciones debidas al concepto de capa límite desarrollado por Prandtl:

- Desaparece la ecuación del movimiento en la dirección Y (placa plana unidimensional).
- El gradiente de presiones en dirección perpendicular al flujo es nulo.
- Los términos de disipación viscosa se desprecian por considerar un número Ec muy pequeño.
- Los términos de orden superior en X se desprecian frente a los de orden menor.

De esta manera se tiene un sistema de ecuaciones se reduce a tres ecuaciones simplificadas:

**Ecuación final de continuidad:**

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (E-II.46)$$

**Ecuación final de cantidad de movimiento en dirección X:**

$$U \cdot \frac{\partial U}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial Y} = + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (E-II.47)$$

**Ecuación final de la energía:**

$$U \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{RePr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (E-II.48)$$

Se tiene por último un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas que son las velocidades longitudinal U y transversal V junto con la temperatura  $\theta$ .

Estas ecuaciones permiten resolver la capa límite y definirla mediante dos tipos de métodos:

- Método integral de Von Kaman.
- Método exacto de Polhausen.

No se planteará la resolución por estos métodos porque es larga y no se hará uso de ellos en nuestro desarrollo práctico.

Una vez resuelta la capa límite, y teniendo como objetivo calcular el valor del coeficiente de película para poder aplicar la ecuación de enfriamiento de Newton se operara de la siguiente manera:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Se establece un balance de energía a la capa de fluido que está en contacto con la superficie y que por tanto no tiene movimiento por lo que, el calor que la atraviesa por conducción debe ser el mismo que el que se intercambia entre la superficie y la zona de fluido potencial o desarrollado.

Para la siguiente capa límite (figura III.9) y considerando las leyes de Fourier y de enfriamiento de Newton:

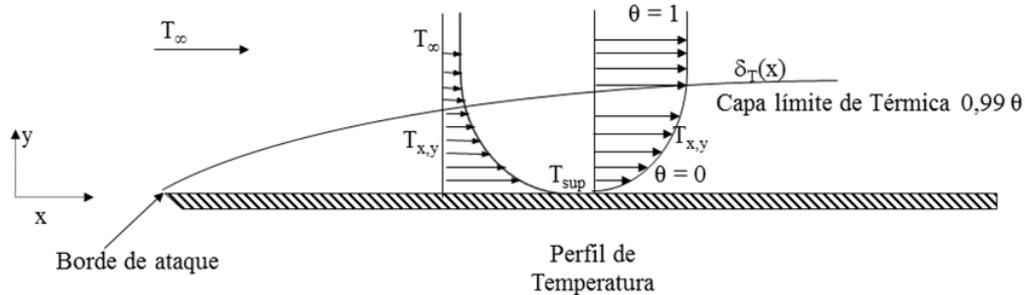


Figura III.94 Elemento diferencial para el balance de masa

$$h \cdot (T_{sup} - T_{\infty}) = -K_{flu} \left( \frac{dT}{dy} \right)_{y=0} \quad (E-II.49)$$

Adimensionalizando:

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_{sup} - T_{\infty}}; Y = \frac{y}{L} \quad (E-II.50)$$

Y reordenando términos, aparece el Nusselt:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k_{flu}} = \left( \frac{d\theta}{dY} \right)_{Y=0} \quad (E-II.51)$$

Como puede verse en la Ec VI.35, si conocemos la capa límite adimensionalizada del desarrollo anterior, el número de Nusselt y con ello el coeficiente de película se conocerá nada más que derivando la expresión de la capa límite adimensionalizada y sustituyendo para el valor de la superficie  $Y=0$ .

En la mayoría de los casos no se va a disponer de la solución de la capa límite y el procedimiento de cálculo para la misma es muy tedioso. Por ello se recurre a correlaciones de carácter semiempírico a través de los números adimensionales anteriormente descritos. De esta manera estas correlaciones, en función del tipo de fenómeno (convección forzada, natural o con cambio de fase) y del régimen de flujo (turbulento, laminar o transitorio), nos permitirán

calcular el número de Nusselt y una vez conocido, el cálculo del coeficiente de película será inmediato.

Un esquema del procedimiento que se suele llevar a la hora de enfrentarse a problemas de transmisión de calor por convección es el siguiente:

1. Determinar el tipo de problema. Esto es si nos encontramos ante convección forzada, natural o de cambio de fase y determinar la geometría del flujo del problema.
2. Evaluación de varias propiedades del fluido a temperatura de película.
3. Determinar si el flujo es turbulento o laminar.
4. Aplicar una correlación válida para nuestro problema que nos permita obtener el número de Nusselt.
5. Despejar el coeficiente de película y con ello resolver el problema de transmisión por calor.

La temperatura de película anteriormente nombrada se define como la media de las temperaturas de la superficie y del flujo potencial:

$$T_{\text{película}} = \frac{T_{\infty} - T_{\text{sup}}}{2} \quad (\text{E-II.52})$$

## Transmisión de calor por radiación

---

Es el último mecanismo de transmisión de calor existente. Se define como:

*“Mecanismo de transferencia de energía que se basa en el intercambio de radiación térmica entre los cuerpos” [4].*

La radiación térmica a su vez es definida como radiación electromagnética emitida en todas las direcciones por todos los cuerpos por estar excitados térmicamente, es decir por tener una temperatura diferente al 0K absoluto.

Al deberse a radiación electromagnética no necesitan medio físico para su transporte.

Es un fenómeno que está presente en todos los cuerpos pero que solo cobra importancia con respecto al resto de mecanismos de transmisión de calor cuando la temperatura de los cuerpos es considerablemente alta.

El fenómeno se rige por la Ley de Stefan-Boltzmann que dice que el flujo de calor emitido por un cuerpo a una determinada temperatura es igual al área A del mismo multiplicado por una propiedad llamada emisividad  $\varepsilon$  y la temperatura T absoluta en Kelvin elevada a la cuarta. Todo ello multiplicado por una constante  $\sigma$ , llamada constante de Stefan-Boltzmann:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

$$Q = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{E-II.53})$$

El valor de esta constante es muy pequeña,  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ , lo que hace ver que es necesaria una alta temperatura para que el flujo de calor sea significativo.

La emisividad  $\varepsilon$ , es una propiedad de la superficie emisora y varía entre la emisividad de un cuerpo negro  $\varepsilon = 1$  y la de un cuerpo blanco  $\varepsilon = 0$ , siendo la mayoría de los cuerpos considerados grises con  $0 < \varepsilon < 1$ .

La ley de Stephan-Boltzmann nos dice que todo cuerpo emite un flujo de calor. Sin embargo lo que es interesante es el flujo de calor neto intercambiado entre varios cuerpos a través de sus superficies. Realizando un balance de energía radiante entre dos superficies A y B y teniendo en cuenta que una superficie puede no “ver” completamente a la otra, llegamos a:

$$Q = F_{A-B} \cdot A_A \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_A^4 - T_B^4) \quad (\text{E-II.54})$$

El factor  $F_{A-B}$  se denomina factor de forma de la superficie A con B (figura VI.2.9) y representa lo que antes se ha llamado como “no ver completamente una superficie a otra.” Ver a una superficie completamente se refiere a lo siguiente:

La radiación térmica emitida por un cuerpo a través de la superficie sale en todas las dimensiones.

Sin embargo hay rayos como el azul representado en la figura VI.2.10, que saliendo de una superficie no impacta en la segunda.

Por ello se define el factor de forma  $F_{A-B}$  que representa la fracción de radiación emitida por la superficie A que llega a la B.

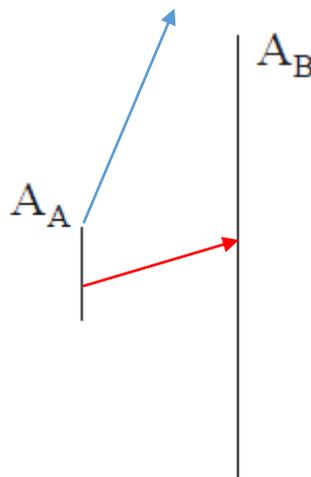


Figura III.95 Ejemplo de dos superficies radiantes

Por definición, el factor de forma solo puede tomar valores entre 1 y 0.

Estos balances pueden realizarse con un número mayor de superficies y existen métodos para simplificar los cálculos con muchas superficies como puede ser la analogía de resistencias. Sin embargo, no se va a entrar en este tema pues en este trabajo se realizará dicho desarrollo.

### 1.3. Ecuaciones utilizadas

---

Una vez conocidos los sistemas de transferencia de calor, es el momento de ver como estos se aplican a nuestro problema. En este apartado se incluirán todas las ecuaciones que se utilizarán en el desarrollo del estudio.

#### Cálculo de los coeficientes globales

---

Para poder calcular el flujo de calor que sale de la cámara por cada superficie lo primero que se hará será calcular los coeficientes globales de cada superficie, de tal modo que sabiendo la diferencia de temperaturas se pueda calcular el flujo de calor mediante la siguiente fórmula:

$$Q = U * A * \Delta T \quad (\text{E-II.55})$$

Siendo Q el flujo de calor, U el coeficiente global de transmisión, A el área y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas [5].

Las paredes de la doble piel se pueden simplificar por placas planas ya que el espesor es despreciable en comparación a la altura y al ancho. En este caso el coeficiente global se define como:

$$U = \frac{1}{\sum \frac{1}{h} + \sum \frac{e}{k}} \quad (\text{E-II.56})$$

Siendo e el espesor del sólido, k la conductividad del sólido y h el coeficiente de película [4].

Como formulación alternativa también se puede utilizar:

$$Q = \frac{A * \Delta T}{R} \quad (\text{E-II.57})$$

Donde se establecen las resistencias por conducción:

$$R_{\text{conducción}} = \frac{e}{k} \quad (\text{E-II.58})$$

y también por convección:

$$R_{Convección} = \frac{1}{h} \quad (E-II.59)$$

Debido a que las condiciones en el exterior son variables, es difícil precisar con seguridad el coeficiente de película exterior en cada instante, ya que este varía con la temperatura y la velocidad del aire. Para estimarlo se recurrirá a suponer una velocidad y temperatura constante. De este modo, el coeficiente global será el mismo a lo largo de toda la simulación.

Para poder calcular el coeficiente global es necesario saber el coeficiente de película asociado a las paredes del edificio. En el interior se producirán fenómenos de convección natural y en el exterior de convección forzada (debido al viento).

Para el cálculo en el interior, donde se producirá convección natural, se utilizarán las expresiones dadas por Churchill y Chu:

$$Nu = 0.68 + 0.67 * \frac{Ra^{\frac{1}{4}}}{[1 + (\frac{0.492}{Pr})^{\frac{9}{16}}]^{\frac{4}{9}}} \quad (E-II.60)$$

Con validez para  $0 < Pr < \infty$ , y  $Ra < 10^9$ .

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{[1 + (\frac{0.492}{Pr})^{\frac{9}{16}}]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad (E-II.61)$$

Con validez para  $0 < Pr < \infty$ , y  $Ra > 10^9$ .

Siendo Nu el número de Nusselt, Ra el número de Rayleigh, Pr el número de Prandtl [4].

El Rayleigh se puede obtener como producto del Grashof por el Prandtl [4]:

$$Ra = Gr * Pr \quad (E-II.62)$$

El número de Grashof se define como:

$$Gr = \frac{\beta * g * L^3 * (T_p - T_{\infty})}{\nu^2} \quad (E-II.63)$$

Siendo Ra el número de Rayleigh, Gr, el número de Grashof, Pr, el número de Prandtl, g, la aceleración de la gravedad, L, la longitud característica, Tp es la

temperatura de la pared,  $T_{\infty}$ , es la temperatura del fluido alejado de la pared o corriente libre,  $\nu$ , es la viscosidad cinemática,  $\beta$ , es el coeficiente de expansión térmica [4].

Que relacionan el número de Nusselt con el coeficiente de película de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{h * L}{k_f} \quad (E-II.64)$$

Siendo  $Un$ , el número de Nusselt,  $h$ , el coeficiente de película,  $L$ , la longitud característica y  $k_f$ , la conductividad del fluido [4].

Para el cálculo en el interior, donde se producirá convección forzada, se utilizarán las expresiones dadas por Colburn para capa límite mezclada:

$$Nu = (0.037 * Re^{0.8} - 871) * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (E-II.65)$$

Siendo  $Nu$ , el número de Nusselt,  $Re$ , el número de Reynolds y  $Pr$ , el número de Prandtl [6].

Donde el Reynolds se define como:

$$Re = \frac{v * L}{\nu} \quad (E-II.66)$$

Donde  $v$  es la velocidad del fluido,  $L$ , la longitud característica, y  $\nu$ , la viscosidad cinemática [4].

## 1.4. Radiación incidente

Uno de los problemas que se plantea durante el desarrollo del TFG es el cálculo de la radiación que reciben en cada momento los cerramientos de la doble piel y los paneles fotovoltaicos.

El movimiento de la Tierra alrededor del Sol y la rotación terrestre hacen que el ángulo de incidencia sobre los cerramientos y los paneles fotovoltaicos cambie a lo largo del día, cambiando, por tanto, la fracción de energía por parte del Sol que reciben los mismos. El cambio de ángulo de incidencia se puede apreciar en la imagen inferior:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

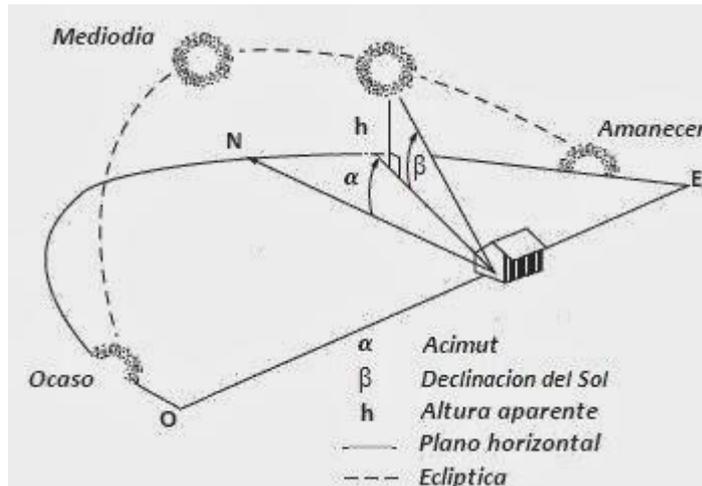


Figura III.96 cambio de ángulo de incidencia

Además, también existen diferentes ángulos de incidencia para cada día del año. De nuevo, el movimiento de la Tierra alrededor del Sol y la rotación terrestre hacen que el ángulo de incidencia sobre los cerramientos y los paneles fotovoltaicos cambie de unos días a otros, y, por tanto, la fracción de energía por parte del Sol que reciben los mismos. Esto se puede apreciar en la imagen inferior:

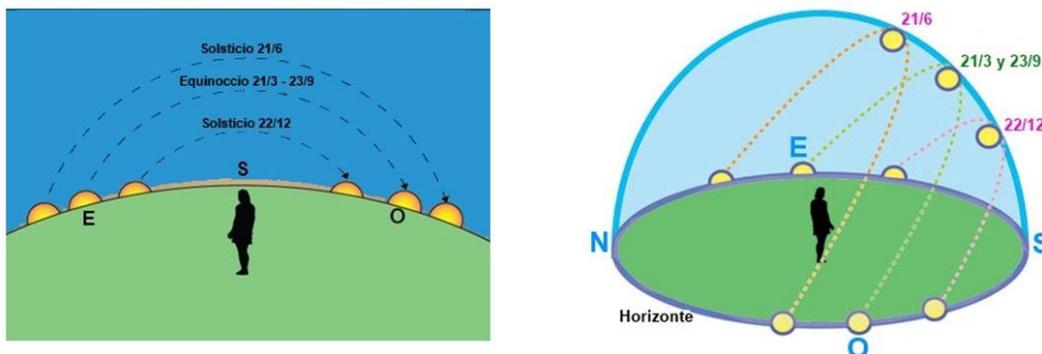


Figura III.97 cambio de ángulo de incidencia [W1]

Existen ecuaciones que relacionan el ángulo de incidencia a lo largo del día con la hora actual y las horas de luz hasta el ocaso. Estas ecuaciones aumentarían la precisión del modelo, sin embargo, también aumentarían el coste computacional del mismo y el tiempo de implementación en el desarrollo del modelo.

Debido a lo postulado anteriormente, se ha recurrido a buscar una simplificación, disminuyendo el coste computacional del mismo y el tiempo de implementación en el desarrollo del modelo.

En la simplificación propuesta se utilizará un coeficiente de corrección para todo el periodo. El coeficiente se determinará según lo establecido para el IDAE para paneles fotovoltaicos.

El hecho de determinar este coeficiente para todo el periodo de la misma manera implica una pérdida de exactitud. Esto tendrá dos vertientes: pérdida de exactitud en la producción fotovoltaica y pérdida de exactitud a nivel térmico.

Respecto del nivel térmico, cabe comentar que la ganancia térmica será mayor a primeras horas del día en los cerramientos dirección este (ya que el Sol sale por allí) y menor en los cerramientos dirección oeste, de modo que ambas ganancias se compensarían. A última hora del día ocurriría lo contrario, la ganancia térmica será mayor en los cerramientos dirección oeste (ya que el Sol se pone por allí) y menor en los cerramientos dirección este. En las horas centrales del día estos valores estarían compensados.

En conclusión, si se tiene en cuenta la globalidad del modelo térmico, no se disminuye tanto la precisión.

De este modo, la pérdida de exactitud será especialmente notoria para la producción fotovoltaica ya que si que existirán variaciones a lo largo del día sin posibilidad de ser compensadas.

Sin embargo, teniendo en cuenta todo el periodo de medida en vez de las medidas puntuales, aunque la precisión se disminuya a nivel de medida, cuando se evalúen los datos en conjunto, el valor proporcionado será realista ya que el IDAE estima el coeficiente a nivel global en vez de forma horaria.

Para determinar las pérdidas derivadas de orientación e inclinación de los superficies de la doble piel se ha recurrido al Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura [7].

## **Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura**

---

Para realizar el cálculo de la radiación incidente se tiene como dato de partida la radiación sobre superficie horizontal. Este dato se deberá corregir en función del acimut e inclinación de los paneles. También han de tenerse en cuenta las sombras proyectadas por obstáculos, pero no existe ninguna construcción que bloquee la radiación sobre la superficie de modo que esta corrección no será considerada.

### Corrección por azimut y la inclinación de los paneles.

---

El ángulo de inclinación,  $\beta$ , está definido como el ángulo que forma la superficie de los captadores con el plano horizontal. Su valor es  $0^\circ$  para captadores horizontales y  $90^\circ$  para verticales.

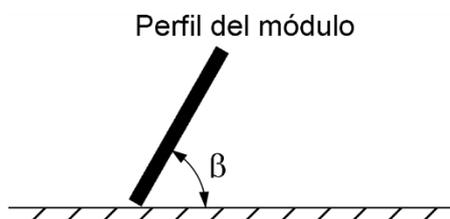


Figura III.98 Ángulo de inclinación,  $\beta$

El azimut  $\alpha$  está definido como el ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del captador y el meridiano del lugar.

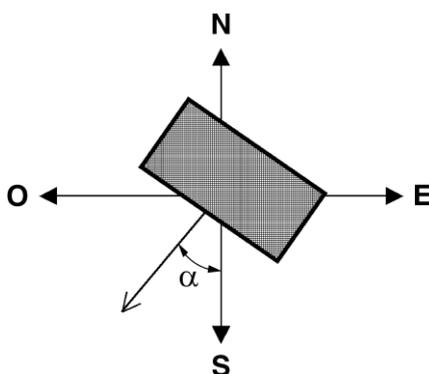


Figura III.99 Azimut  $\alpha$

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

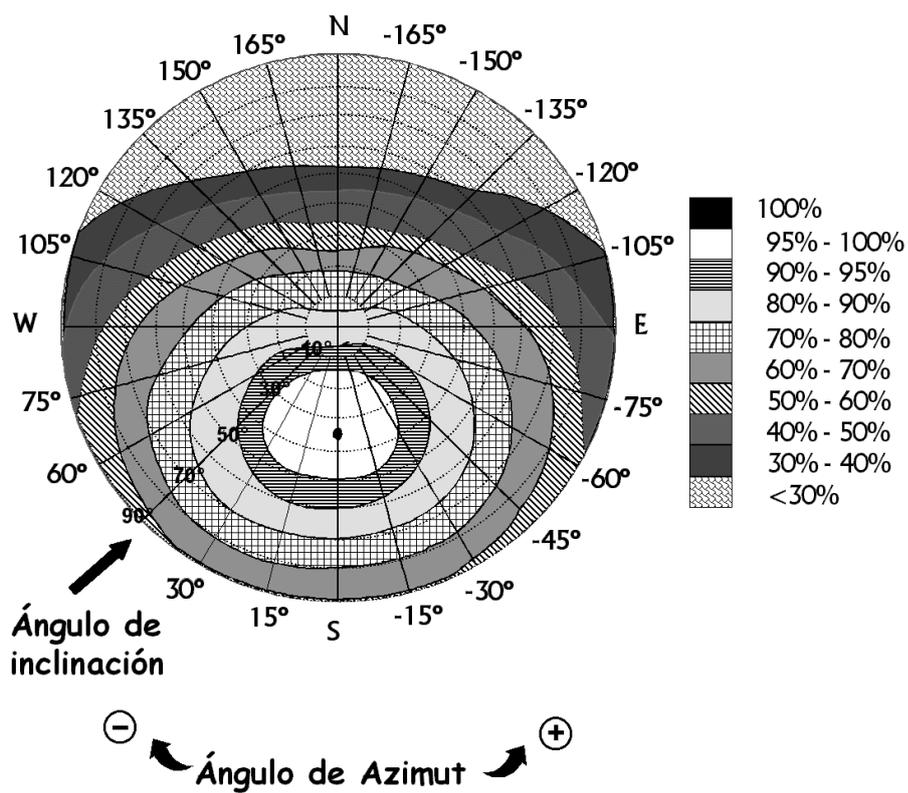


Figura III.100 Corrección por ángulo de inclinación y acimut [7]

A este factor de corrección se le denominará  $K_{\alpha\beta}$ .

---

## 2. ECUACIONES Y BALANCES EN LA DOBLE PIEL

---

Para reducir la demanda energética del Edificio Lucía de la Universidad de Valladolid en periodo de invierno se propone como mejora el uso del calor acumulado en la doble piel introduciendo el aire al interior del edificio. De esta manera se reducirían las pérdidas de energía que se tienen con el exterior y se aclimatarían zonas del edificio reduciendo así los costes de calefacción en invierno. Además, cabe la posibilidad de introducir aire del exterior disminuyendo de esta manera el caudal de ventilación.

Antes de poder evaluar los posible ahorros, es necesario conocer el comportamiento de la doble piel. Para ello, lo primero que se ha de calcular es la cantidad de energía que está ganando el edificio en caso de que no se estuviera recirculando aire. Esto se realizará mediante un balance energético a la doble piel.

### 2.1. División de la doble piel

---

Para realizar este análisis se dividirá la doble piel en zonas que se denominarán por números, correspondiéndose cada número a una pared. Para el cálculo de las diferentes constantes necesarias en la modelización se seguirá esta numeración, correspondiendo cada constante a su zona correspondiente

Las zonas son las siguientes:

Tabla III.37 Zonas en la doble piel

Número de zona	Zona
1	Zona trasera interior
2	Zona delantera con fotovoltaicos
3	Zona delantera vidriada
4	Zona lateral derecha
5	Zona superior
6	Zona lateral izquierda
7	Zona trasera exterior
8	Zona inferior

Cada una de estas zonas se ilustra a continuación

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura III.101 Zona trasera interior (zona 1)

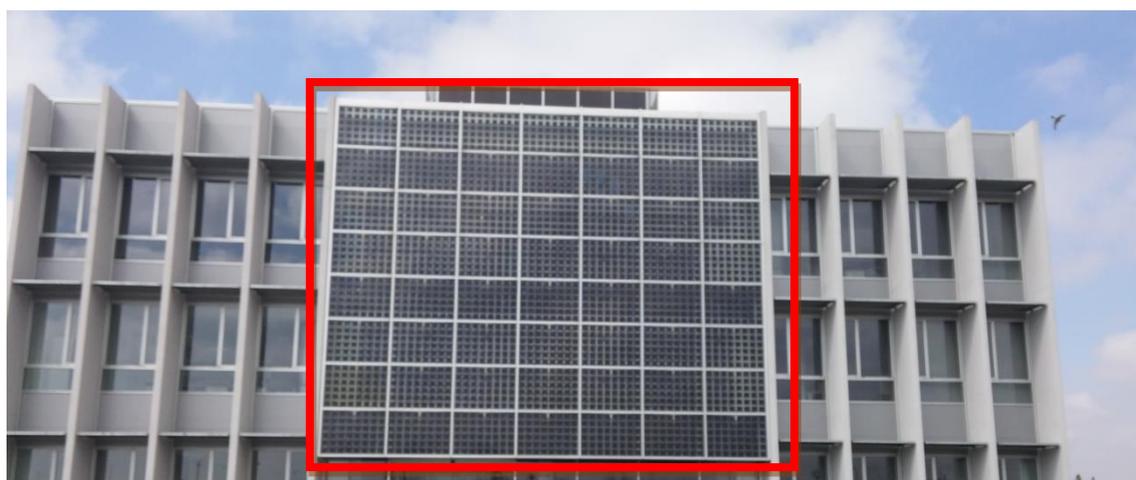


Figura III.102 Zona delantera vidriada y con fotovoltaicos (zonas 2 y 3)

Nótese que aunque tanto para la zona delantera con fotovoltaicos, como para la zona delantera vidriada, se haya utilizado la misma ilustración. Éstas se refieren a zonas diferentes, ya que aunque ambas se encuentren unidas en el mismo panel, sus propiedades térmicas son diferentes, y se deben evaluar por separado. Abajo se presenta un detalle de un panel:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

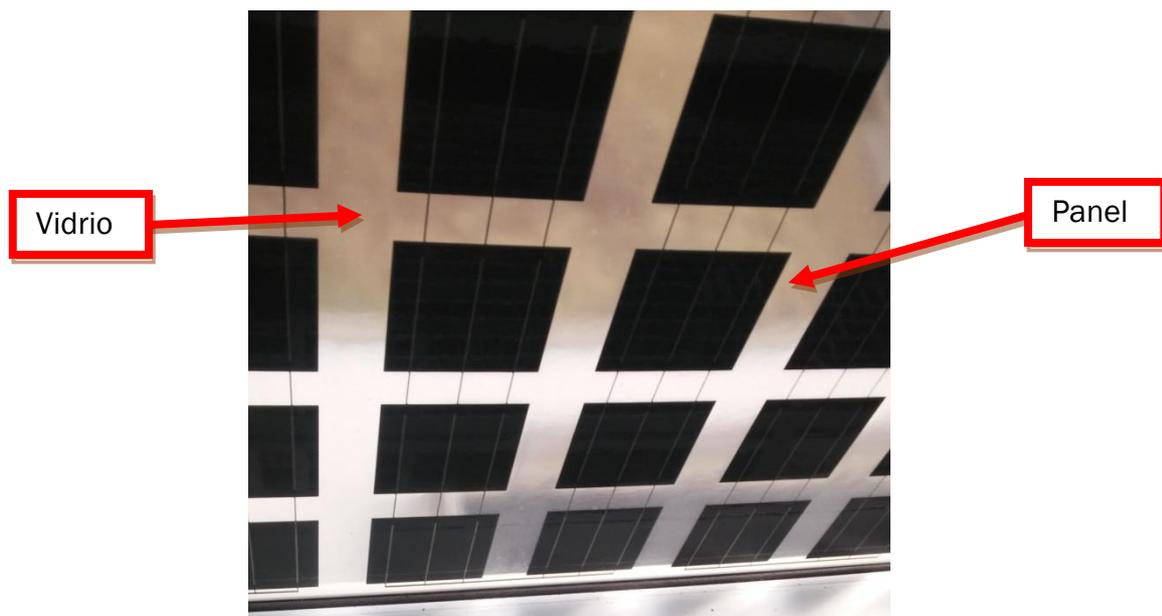


Figura III.103 Detalle de un panel (zonas 2 y 3)

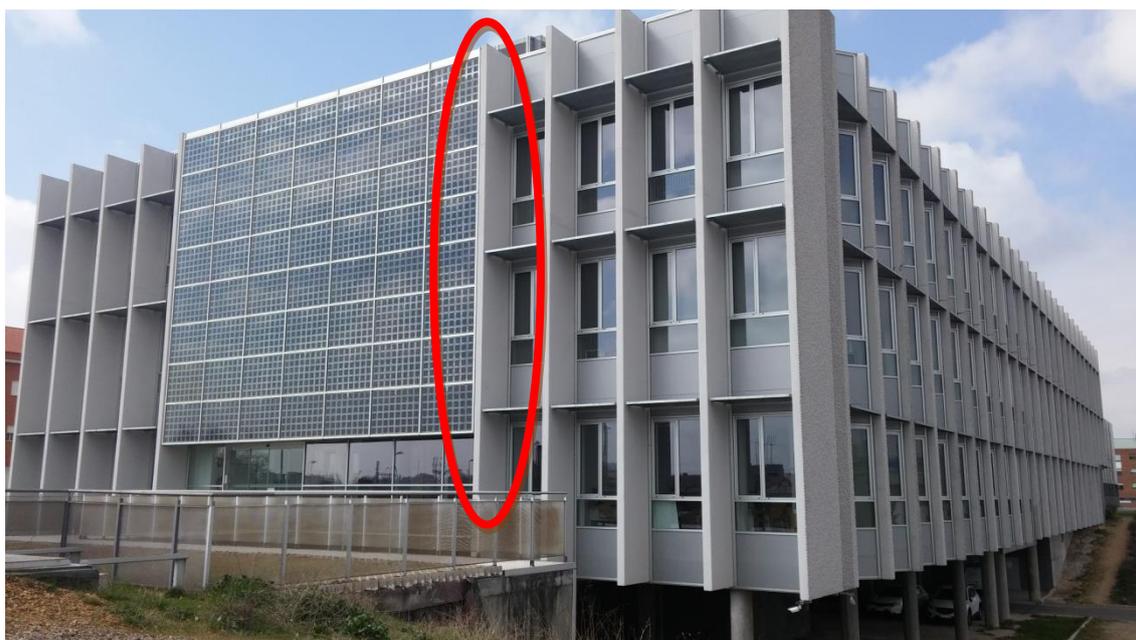


Figura III.104 Zona lateral derecha (zona 4)

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura III.105 Zona superior (zona 5)



Figura III.106 Zona lateral izquierda (zona 6)

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.



Figura III.107 Zona trasera exterior (zona 7)



Figura III.108 Zona inferior (zona 8)

## 2.2. Radiación incidente

---

Lo primero que se analizará para modelar la doble piel es la radiación que reciben los cerramientos exteriores que la componen.

La radiación incidente no se mide de forma directa sobre la doble piel. El único dato disponible es el de radiación sobre superficie horizontal. Se pretende relacionar esta radiación con aquella que reciben los cerramientos.

Como se dijo en el apartado anterior, se podría realizar un estudio que recoja la posición del Sol en cada instante y que calcule la fracción de energía por parte del Sol que reciben los cerramientos, sin embargo, esto se escapa al ámbito de este TFG.

Como solución, se plantea la suposición inicial de que la radiación incidente será proporcional a la radiación sobre superficie horizontal, de modo que se definirá como el producto de la radiación solar sobre superficie horizontal por una determinada constante que dependerá de la zona de estudio.

Se denominará  $Q_{Sol}$  a la radiación solar sobre superficie horizontal y  $K_{Sol,i}$  a esa constante donde  $i$  tomará el número de la zona de estudio (este es criterio que se seguirá a lo largo de todo el estudio).

A continuación se muestra la modelización que se utilizará de aquí en adelante para los cerramientos exteriores de la doble piel:

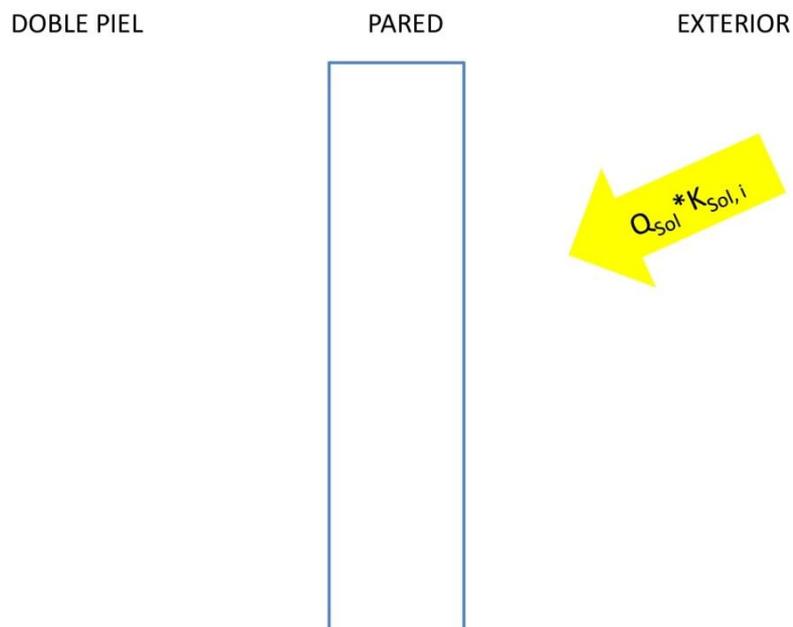


Figura III.109 modelización

### Calculo de $K_{Sol,i}$

---

$K_{Sol,i}$  recoge las constantes que modifican la radiación sobre superficie horizontal para obtener la energía que absorben los cerramientos.

Las correcciones que se proponen tendrán en cuenta la absortividad, el acimut, el ángulo de inclinación de los paneles y las sombras proyectadas por obstáculos.

Como se expuso en el apartado anterior, al no existir ninguna construcción o algún otro elemento que bloquee la radiación sobre la doble piel (por ejemplo árboles, farolas...), la corrección por las sombras proyectadas por obstáculos no será considerada.

Finalmente,  $K_{Sol,i}$  se define como:

$$K_{Sol,i} = \alpha_i * K_{\alpha\beta,i} \quad (E-II.67)$$

En el estudio posterior no se incluirán ciertas superficies. Los criterios seguidos para no incluir esas superficies son los siguientes:

Tabla III.38 Criterios exclusivos de  $K_{Sol}$

Superficie	Criterio
Horizontal (con superficie exterior mirando al cielo) (Zona 5)	La radiación medida por la estación meteorológica del edificio Lucia ya es sobre superficie horizontal de modo que no es necesario ningún coeficiente de corrección.
Vertical (con superficie exterior mirando al norte) (Zona 7)	Se considera que en las superficies dirigidas al norte la radiación directa incidente es despreciable. No se tiene en cuenta la radiación difusa.
Horizontal (con superficie exterior mirando al suelo) (Zona 8)	Se considera que en las superficies horizontales mirando al suelo la radiación directa incidente es despreciable. No se tiene en cuenta la radiación difusa.

### *Absortividad*

El primer valor que se debe conocer para el cálculo de  $K_{Sol,i}$  es la absortividad. El proceso desarrollado para obtención de la absortividad se recoge en el apartado "estudio experimental en la doble piel" en el subapartado "desarrollo de experimentos".

Al ser la absortividad una característica de los materiales, ésta no depende de la zona en que se encuentren éstos, por tanto, se agruparán las zonas que poseen los mismos materiales. A continuación se presentan los valores de absortividad:

Tabla III.39 absortividad

Material	Zonas	Absortividad, $\alpha_i$
Fotovoltaicos	2	0.76 <sup>17</sup>
Vidrio	1,3	0
Hormigón	4,5,6	0.94

### *Corrección por azimut e inclinación.*

El segundo valor que se debe conocer para el cálculo de  $K_{Sol,i}$  es la corrección por azimut e inclinación. En nuestro caso el acimut es de 55° y -125° para los

<sup>17</sup> El valor de 0,76 no se trata de la absortividad del panel fotovoltaico. Este valor se obtiene de restar del valor de la absortividad del panel su rendimiento teórico (15%). Representa la cantidad de energía en forma de radiación que se transforma en energía térmica de modo que es el valor que se utiliza en el modelo.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

laterales y  $-35^\circ$  para la fachada principal, y el ángulo de inclinación es de  $90^\circ$  para todos los cerramientos laterales.

Para calcular el factor de corrección se utilizarán las figuras descritas en el apartado fundamentos teóricos.

A continuación se presenta el cálculo de los diferentes factores de corrección por azimut e inclinación:

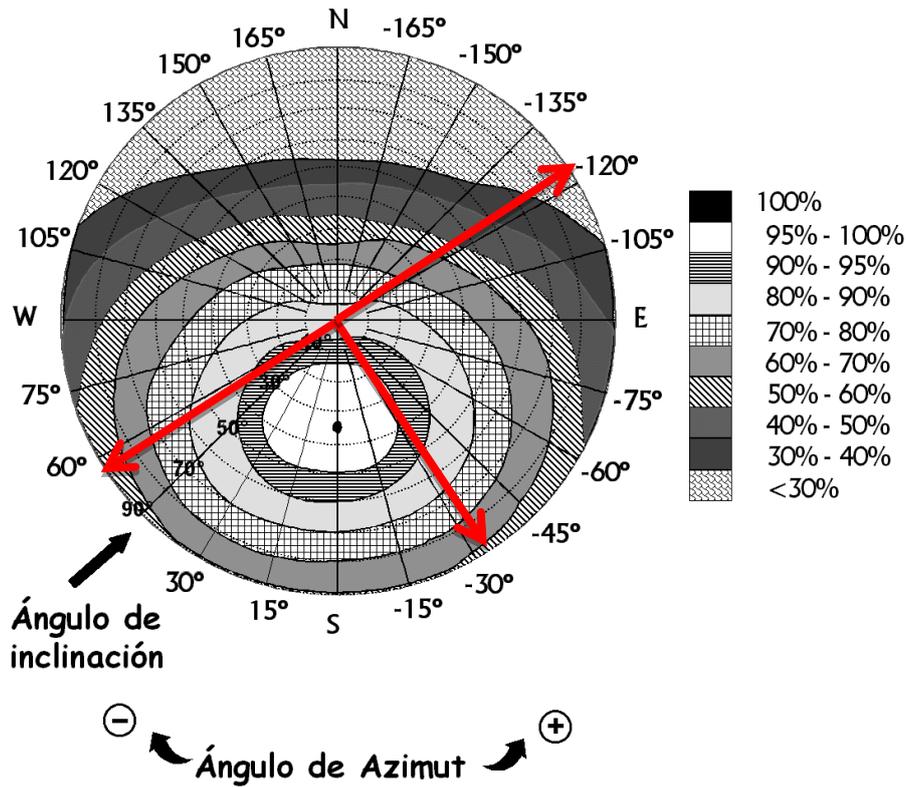


Figura III.111 Cálculo del factor de corrección

A este factor de corrección se le denominará  $K_{\alpha\beta}$ . Los resultados se recogen en la siguiente tabla:

Tabla III.40  $K_{\alpha\beta}$

Zona	Azimut, $\alpha$	Ángulo de inclinación, $\beta$	$K_{\alpha\beta}$
6	$-125^\circ$	$90^\circ$	0.2
2,3	$-35^\circ$	$90^\circ$	0.6
4	$55^\circ$	$90^\circ$	0.55

$K_{Sol,i}$

Una vez calculados todos los factores de corrección ya se puede obtener  $K_{Sol,i}$ . Los valores de  $K_{Sol,i}$  se presentan en la siguiente tabla:

Tabla III.41  $K_{Sol,i}$

Zona	$K_{Sol,i}$
1	0
2	0,45
3	0
4	0,52
5	0,94
6	0,19
7	0
8	0

## 2.3. Balances de energía

---

Una vez conocida la radiación solar ganada en las paredes ya se pueden empezar a realizar los balances de energía. El primer balance a realizar es el de la cámara con el exterior.

### Balance de la cámara con el exterior

---

Debido a la radiación solar, no se puede realizar directamente el balance entre la cámara y el exterior, ya que hay ganancia térmica en la pared. Por tanto, se deben dividir las diferentes paredes en dos tramos, con unos flujos de calor diferentes.

Para ello se han de distinguir tres lugares: el exterior, la superficie exterior de la pared y la cámara. Cada uno de ellos tendrá una temperatura asociada:  $T_{ext}$ ,  $T_{p,i}$  y  $T_c$  respectivamente. Esto se muestra en la imagen inferior:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

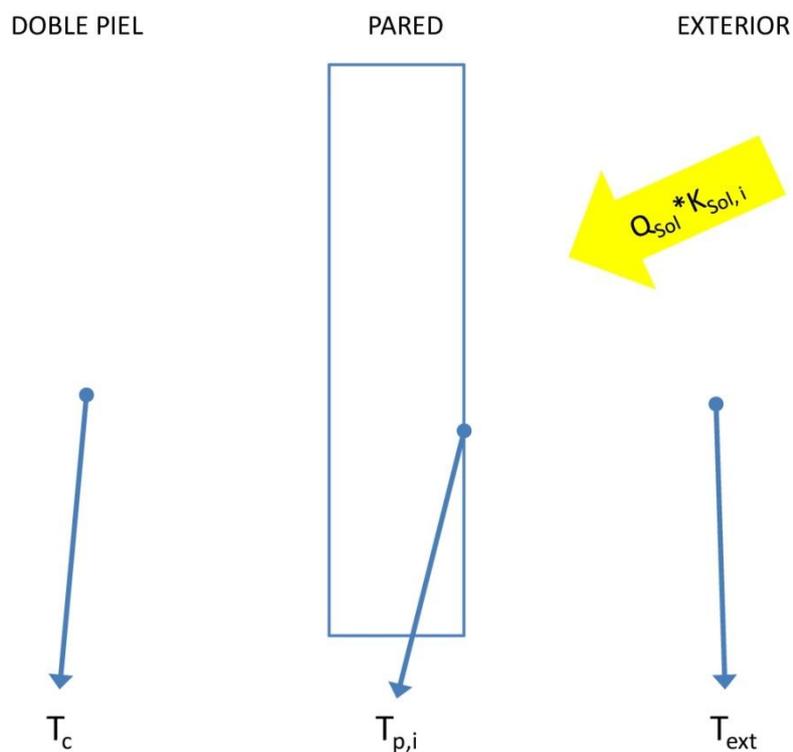


Figura III.112 Temperaturas en la pared

Nótese que el modelo supone una temperatura constante en todo el interior, cuando en la realidad pueden existir fenómenos de estratificación térmica que hagan que la temperatura no lo sea. Ésta hipótesis será necesario validarla con posterioridad, evaluando sus consecuencias. La posterior validación del modelo se recoge en el siguiente subapartado "Comparación con resultados experimentales".

Como se ha dicho previamente, entre estos lugares se distinguirán dos flujos de calor, con unas resistencias asociadas a cada flujo diferentes. Denominaremos  $R_{int, i}$  a la resistencia que hay entre la cámara y la pared exterior, y  $R_{ext, i}$  a la resistencia que hay entre la pared exterior y el exterior. Esto se muestra en la imagen inferior:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

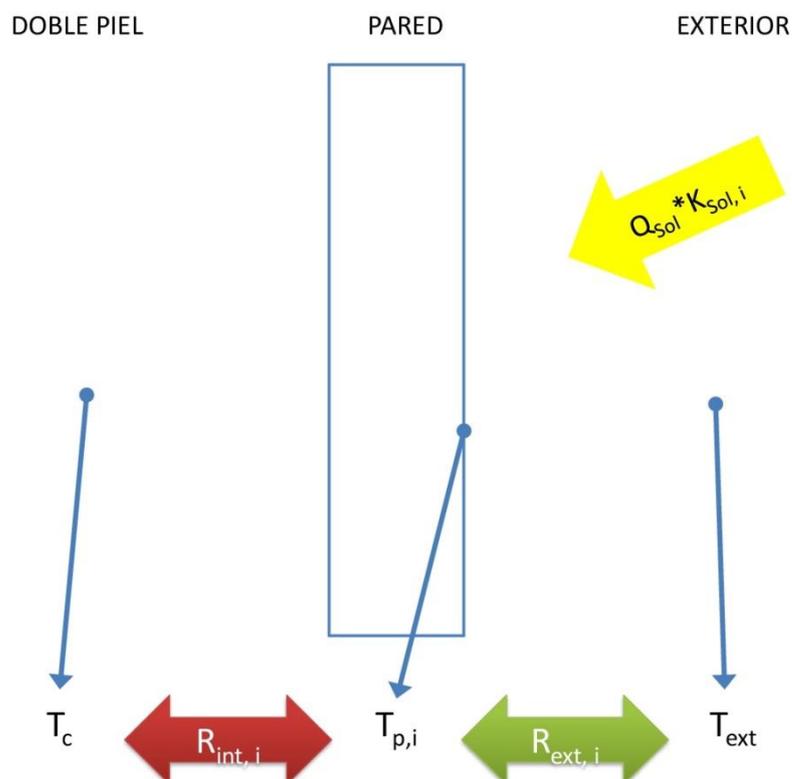


Figura III.113 Resistencias en la pared

Respecto a los flujos de calor, se denominará  $Q_{int, i}$  al flujo de calor entre la cámara y la pared exterior, y  $Q_{ext, i}$  al flujo de calor entre la pared exterior y el exterior.

Finalmente, la pared exterior quedará modelada de la siguiente manera:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

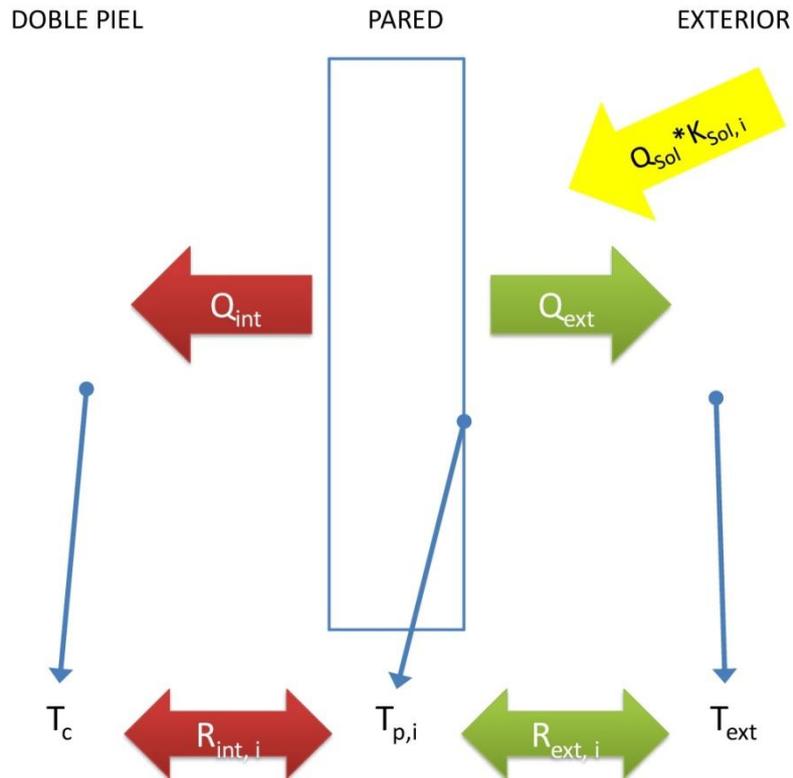


Figura III.114 Calor en la pared

Si realizamos un balance de energía se obtiene:

$$A_i * Q_{sol} * K_{sol,i} = Q_{int,i} + Q_{ext,i} \quad (E-II.68)$$

Además, si se utiliza la ecuación definida en el capítulo 3, apartado "fundamentos teóricos de la transferencia de calor" se pueden obtener los flujos de calor como diferencia de temperaturas:

$$Q_{int,i} = \frac{T_{p,i} - T_c}{R_{int,i}} * A_i \quad (E-II.69)$$

$$Q_{ext,i} = \frac{T_{p,i} - T_{ext}}{R_{ext,i}} * A_i \quad (E-II.70)$$

De esta manera se puede obtener la temperatura en la pared en función de la radiación incidente y de las temperaturas de la cámara y del exterior.

$$T_{p,i} = \frac{Q_{sol} * K_{sol,i} * R_{int,i} * R_{ext,i} + T_c * R_{ext,i} + T_{ext} * R_{int,i}}{R_{ext,i} + R_{int,i}} \quad (E-II.71)$$

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Nótese que esta fórmula será la empleada en el cálculo del rendimiento de los fotovoltaicos, ya que se considerará que la temperatura en el exterior de la pared coincide con la del panel fotovoltaico.

A partir de la fórmula del calor interior y de la expresión de la temperatura en la pared en función de la radiación incidente y de las temperaturas de la cámara y del exterior se puede obtener el calor interior en función de la radiación incidente y de las temperaturas de la cámara y del exterior:

$$Q_{int,i} = \frac{Q_{Sol} * K_{Sol,i} * R_{int,i} * R_{ext,i} - T_c * R_{int,i} + T_{ext} * R_{int,i}}{(R_{ext,i} + R_{int,i}) * R_{int,i}} * A_i \quad (E-II.72)$$

De este modo se puede expresar el calor interior como unas determinadas constantes que multiplican a la radiación incidente y a las temperaturas de la cámara y del exterior.

Las constantes se definirán como B y C (evitando la letra A para evitar confusiones con el área).

La definición de las constantes B y C se presenta a continuación:

$$C_i = \frac{K_{Sol,i} * R_{ext,i}}{(R_{ext,i} + R_{int,i})} A_i \quad (E-II.73)$$

$$B_i = \frac{A_i}{(R_{ext,i} + R_{int,i})} \quad (E-II.74)$$

Finalmente, el calor interior queda como:

$$Q_{int,i} = C_i * Q_{Sol} + B_i * T_{ext} - B_i * T_c \quad (E-II.75)$$

Esta fórmula será válida siempre, pero en aquellas zonas en las que se considera que no hay radiación solar incidente (por estar sombreadas), o en las que se considera que su absorptividad es nula, el factor  $C_i$  será cero. Para esas zonas:

$$Q_{int,i} = B_i * T_{ext} + B_i * T_c \quad (E-II.76)$$

Esto ocurrirá en las zonas 1, 3, 7 y 8.

Al haber seguido una notación generalista los valores de  $Q_{int,i}$  son válidos para todas las zonas que dan al exterior. De este modo se puede obtener el calor total intercambiado por la doble cámara como suma de todos los calores exteriores. Si se define  $Q_{int}$  como todo el calor intercambiado por la cámara con el exterior:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

$$Q_{int} = \sum_2^8 Q_{int,i} \quad (E-II.77)$$

Este término también se puede expresar de forma más desarrollada en función de  $T_{ext}$ ,  $T_c$  y  $Q_{Sol}$ .

$$Q_{int} = \left( \sum_2^6 C_i \right) Q_{Sol} + \left( \sum_2^8 B_i \right) * T_{ext} - \left( \sum_2^8 B_i \right) * T_c \quad (E-II.78)$$

### *Cálculo de las constantes B y C*

Antes de proseguir con los balances de energía es el momento de recapitular los resultados obtenidos hasta ahora.

Se ha obtenido el calor que gana la cámara por los cerramientos exteriores. Además, también se ha obtenido la temperatura de la pared.

Estas dos variables dependen de: la radiación incidente, las temperaturas de la cámara y del exterior, y de unas constantes que están todavía sin definir.

Parece lógico que antes de continuar realizando balances se definan las diferentes constantes que influyen en el modelo.

Lo primero que se ha de calcular son las resistencias de los cerramientos. Para ello, se utilizarán las ecuaciones, definidas en el apartado fundamentos teóricos.

A continuación se presentarán las características de los cerramientos que fueron utilizadas para efectuar los cálculos:

- Para la zona 1 se supondrá que está compuesta por un vidrio doble con la siguiente composición: vidrio exterior laminado 3+3 mm bajo emisivo, cámara de aire de 16 mm de espesor y vidrio interior laminado 3+3 mm.
- Para la zona 2 se supondrá que está compuesta por un vidrio exterior de 7,17 mm, capa de EVA de 0,5 mm de espesor, panel de silicio de 0,23 mm y capa de tedlar de 0,1 mm.
- Para las zona 3 se supondrá que está compuesta por una lámina de vidrio de 8 mm.
- Para las zonas 4, 5 y 6 se supondrá que están compuestas por una capa de hormigón de 15 cm.
- Para las zonas 7 y 8 se supondrá que están compuestas por una lámina de aluminio exterior de 2 mm, cámara de aire de 16 mm de espesor y una lámina de aluminio interior de 2 mm.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Las conductividades utilizadas fueron las siguientes:

- Para el vidrio se tomará una conductividad (K) igual a 1 W/mK [8].
- Para el aluminio se tomará una conductividad (K) igual a 100 W/mK [8].
- Para el hormigón se tomará una conductividad (K) igual a 2 W/mK [9].
- Para el panel fotovoltaico se tomará una conductividad (K) igual a: 0,35 W/mK para el EVA; 148 W/mK para el silicio; 0,23 W/mK para el tedlar [10].
- Además, para el aire se tomará una conductividad (K) igual a 0,024 W/mK [10].

Para el cálculo de conductividades se necesita conocer la resistencia asociada a cámaras de aire. En aquellos casos en los que la altura sea muy grande en comparación a la anchura se despreciarán los fenómenos de convección, de forma que la resistencia se calcule como si solo existieran fenómenos de conducción [11].

Las resistencias interior y exterior de cada cerramiento se encuentran recogidos en la siguiente tabla:

Tabla III.42 Resistencias interior y exterior de cada cerramiento

Zona	Resistencia interior (m <sup>2</sup> K/W)	Resistencia exterior (m <sup>2</sup> K/W)
1	1,75	0,43
2	0,28	0,046
3	0,28	0,046
4	0,34	0,046
5	0,34	0,046
6	0,34	0,046
7	0,73	0,048
8	0,73	0,048

A partir de estos valores se pueden obtener las constantes  $B_i$  y  $C_i$  para cada zona.

Los valores de las constantes  $B_i$  y  $C_i$  se presentan en la tabla inferior:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Tabla III.43 Constantes  $B_i$  y  $C_i$

Zona	$B_i$	$C_i$
1	52,9	0,00
2	208,2	4,38
3	200,5	0,00
4	35,8	0,86
5	44,4	1,94
6	35,8	0,31
7	21,2	0,00
8	22,2	0,00

### Balance a la cámara

Una vez realizado el balance a las paredes se puede ahora hacer un balance a la cámara. Se puede esquematizar la cámara como:

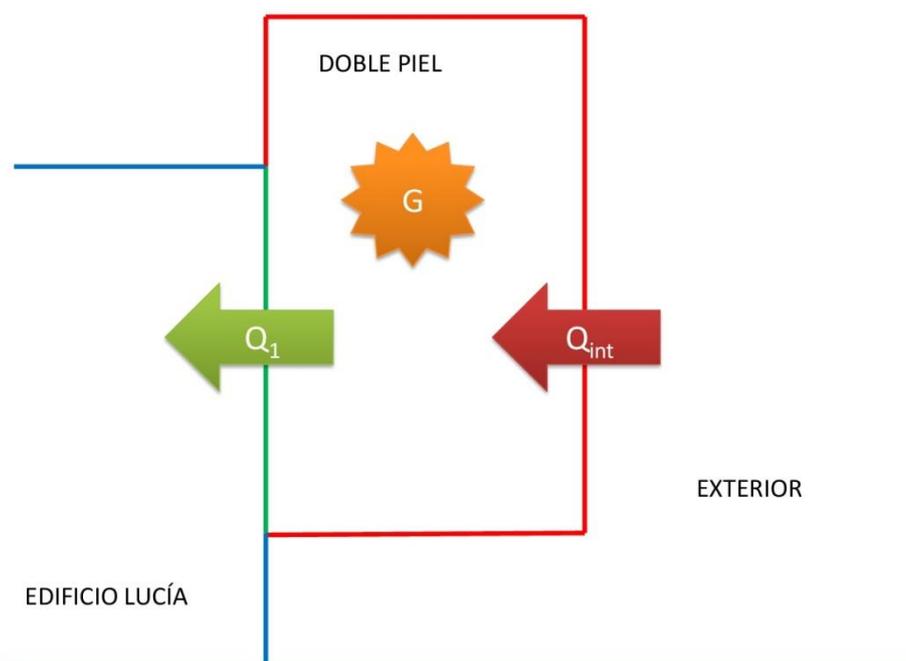


Figura III.115 Balance en la cámara

Donde  $G$  es la ganancia radiante en la doble piel,  $Q_{int}$  es el flujo de calor previamente mencionado y  $Q_1$  es el calor que entra al edificio.

### *Obtención de la ganancia radiante en la doble piel (G)*

Para obtener el valor de G se evaluarán las radiaciones incidentes y se le restará la radiación que sale de la cámara, de nuevo, estas radiaciones se pueden expresar como la radiación incidente sobre superficie horizontal multiplicada por una constante:

$$G = K_{c,2} * Q_{Sol} + K_{c,3} * Q_{Sol} + K_{c,4} * Q_{Sol} + K_{c,5} * Q_{Sol} + K_{c,6} * Q_{Sol} - K_{c,1} * Q_{Sol} \quad (E-II.79)$$

Donde vemos que no se han introducido las zonas 7 y 8 ya que éstas están sombreadas.

### *Calculo de $K_{c,i}$*

Las contantes  $K_{c,i}$  han de reflejar la cantidad de radiación que traspasa las paredes. Por lo tanto, serán iguales al producto de la corrección por acimut y ángulo de inclinación, por la radiación incidente sobre superficie horizontal y por el área, de este modo se obtiene la radiación sobre superficie vertical según la orientación dada. Posteriormente, se multiplica por la transmitividad para obtener finalmente la cantidad de radiación que traspasa las paredes.

$$K_{c,i} = \tau_i * A_i * K_{\alpha\beta,i} \quad \forall i \in [2,6] \quad (E-II.80)$$

Esto ocurre en todo los casos salvo en el caso el caso de  $K_{c,1}$  donde se tiene que tener en cuenta que hay otra pared delante que la quita parte de la radiación. Además, al estar situados los fotovoltaicos en esa pared, la transmitancia tendrá un valor intermedio entre la transmitancia de los fotovoltaicos y la del vidrio. Para calcular este valor se ha ponderado en función del área, con y sin fotovoltaicos, de modo que la transmitancia de la pared  $\tau_p$  es:

$$\tau_p = \frac{\tau_2 * A_2 + \tau_3 * A_3}{A_2 + A_3} \quad (E-II.81)$$

El proceso desarrollado para obtención de la transmitividad se recoge en el apartado "*estudio experimental en la doble piel*" en el subapartado "*desarrollo de experimentos*". Aquí solo se presentarán los valores obtenidos en dicho apartado.

Los valores de la transmitancia  $\tau_i$  son para cada zona:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Tabla III.44 Transmitancia

Zona	Transmitancia, $\tau_i$
1	0,37
2	0,094
3	0,42
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
pared	0,25

De este modo,  $K_{c,1}$  quedará como:

$$K_{c,1} = \tau_p * \tau_1 * A_1 * K_{\alpha\beta,1} \quad (\text{E-II.82})$$

Si reagrupamos los términos:

$$G = [(\sum_2^6 K_{c,i}) - K_{c,1}] Q_{Sol} \quad (\text{E-II.83})$$

Finalmente, los valores de las constantes  $K_{c,i}$  son para cada zona:

Tabla III.45  $K_{c,i}$

Zona	$K_{c,i}$
1	6,4
2	3,8
3	16,3
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0

*Cálculo de  $K_c$*

De nuevo, la ganancia radiante se puede expresar como la radiación incidente sobre superficie horizontal multiplicada por una constante. Que denominaremos  $K_c$ .

$$G = K_c * Q_{Sol} \quad (\text{E-II.84})$$

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Siendo  $K_c$ :

$$K_c = \left[ \left( \sum_2^6 K_{c,i} \right) - K_{c,1} \right] \quad (\text{E-II.85})$$

Finalmente, el valor de  $K_c$  es el siguiente:

Tabla III.46  $K_c$

Constante	Valor
$K_c$	13,7

*Calor entre la cámara y el interior*

Por otro lado,  $Q_1$  también se puede expresar en función de la diferencia de temperaturas:

$$Q_1 = \frac{T_c - T_{int}}{R_1} * A_1 \quad (\text{E-II.86})$$

Si seguimos la misma notación que antes, el cociente entre  $A_1$  y  $R_1$  se puede expresar como  $B_1$ , quedando finalmente  $Q_1$  como:

$$Q_1 = B_1 * T_c - B_1 * T_{int} \quad (\text{E-II.87})$$

En la fórmula anterior se observa que no aparece la temperatura del exterior ni la radiación incidente. Para obtener  $Q_1$  intentaremos obtener la temperatura de la cámara en función de estas variables.

*Balance a la cámara*

Si se recupera el balance a la cámara se obtiene que:

$$Q_1 = G + Q_{int} \quad (\text{E-II.88})$$

Si igualamos  $Q_1$  del balance con el obtenido por diferencia de temperaturas, se puede obtener una expresión que relacione la temperatura en la cámara con la temperatura en el exterior y en el interior, y la radiación incidente:

$$T_c = \frac{\left[ K_c + \left( \sum_2^6 C_i \right) \right] Q_{sol} + \left( \sum_2^8 B_i \right) T_{ext} + B_1 * T_{int}}{\left( \sum_1^8 B_i \right)} \quad (\text{E-II.89})$$

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Conocer la temperatura de la cámara en función de las variables externas servirá en el futuro para la validación del modelo ya que esta temperatura puede ser medida con facilidad introduciendo sondas en la misma y comparada con la obtenida mediante el modelo.

Finalmente, introduciendo la temperatura en la cámara en la ecuación del calor que pasa al interior  $Q_1$  obtenemos la expresión:

$$Q_1 = \frac{[K_c + (\sum_2^6 C_i)] * B_1}{(\sum_1^8 B_i)} * Q_{sol} + \frac{(\sum_2^8 B_i) * B_1}{(\sum_1^8 B_i)} * T_{ext} - \frac{(\sum_2^8 B_i) * B_1}{(\sum_1^8 B_i)} * T_{int} \quad (E-II.90)$$

Esta se trata de la expresión final del calor ganado en la doble piel. Se puede observar que está en función de las variables independientes (temperatura en el exterior e interior y radiación incidente), de modo que se podrá conocer su valor en el futuro conociendo las variables meteorológicas y la temperatura en el interior de la doble piel.

## 3. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez obtenido el modelo de comportamiento es el momento de validar los resultados obtenidos con el modelo con aquellos medidos en la doble piel mediante las sondas de temperatura.

### 3.1. Hipótesis de temperatura

Una de las hipótesis que se formuló a la hora de realizar el modelo es la homogeneidad de temperatura de la doble piel. En la realidad, la temperatura no será homogénea. Las diferencias de densidad provocadas por el calentamiento del aire harán que el aire más caliente ascienda, y que el aire más frío descienda, provocando estratificación térmica vertical. Además, la temperatura puede que varíe a lo ancho de la doble piel debido a el flujo de calor que pudiera darse a través de la paredes laterales, si bien la diferencia de temperaturas será menor que en vertical. Por último, se ha despreciado la variación de temperaturas a lo largo de la doble piel debido al pequeño espacio que separa los cristales interiores de los exteriores en comparación al largo y ancho de la doble piel (aproximadamente diez veces más).

A continuación se muestra un ejemplo de la temperaturas medidas por las diferentes sondas localizadas en el mismo piso:

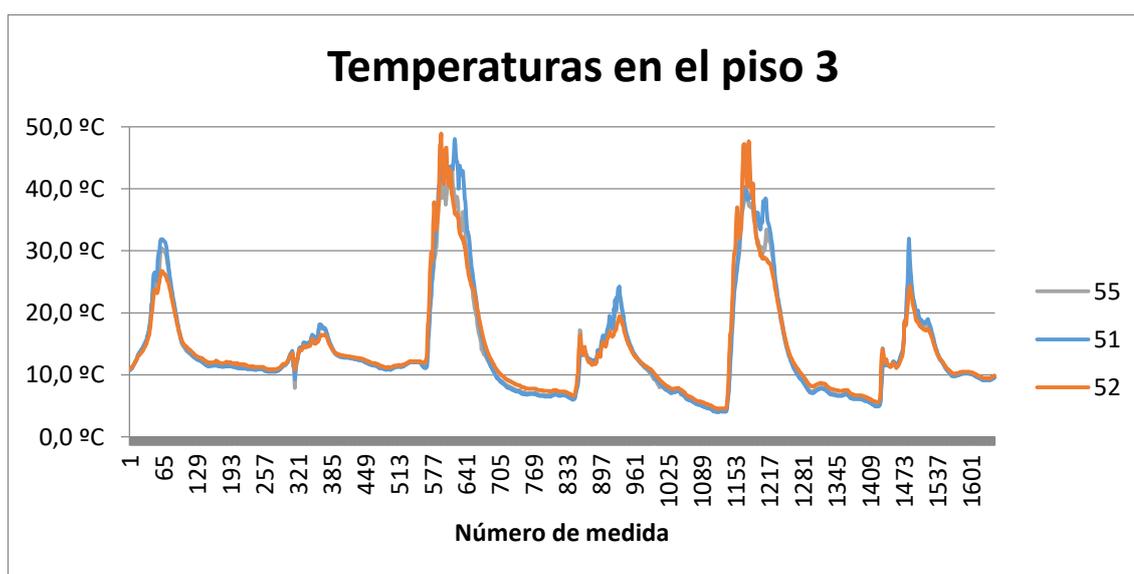


Figura III.116 Temperaturas en el piso 3

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Se puede observar que no hay apenas diferencias entre las medidas a lo ancho de la doble piel, por tanto, se considera que la hipótesis inicial es acertada y que la temperatura es homogénea en la misma altura, para calcularla se hará un media entre las tres temperaturas.

A continuación se muestra un ejemplo de la temperatura para las diferentes altura en las que se colocaron las sondas de temperatura:

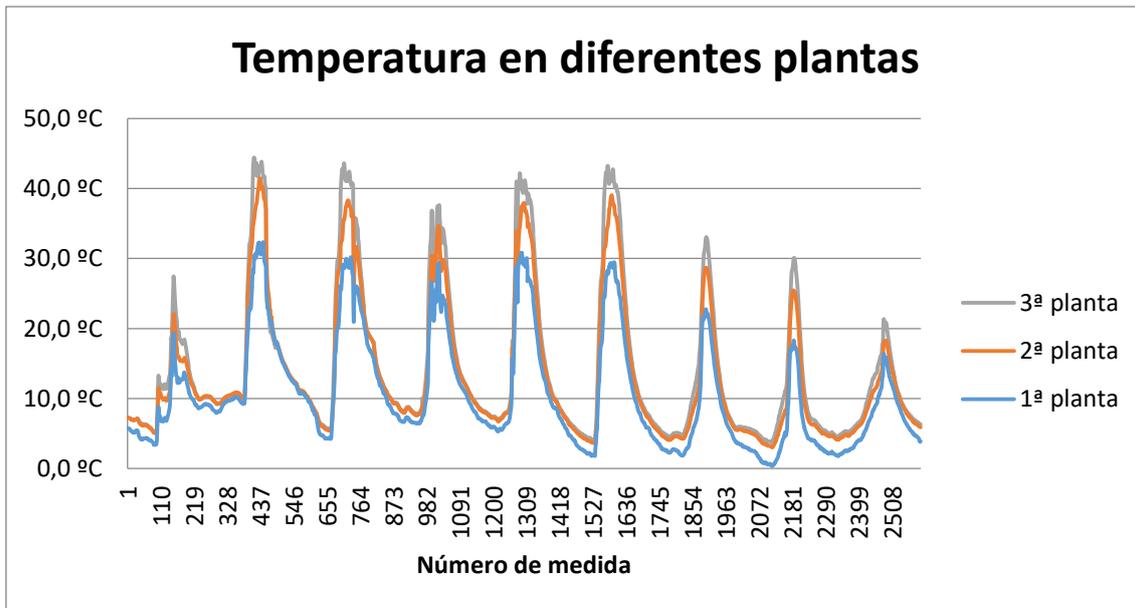


Figura III.117 Temperatura en diferentes plantas

Aquí se puede ver como sí existe estratificación térmica, a medida que se asciende en la doble piel la temperatura aumenta. La diferencia de temperaturas alcanza los 10°C durante el día y se sitúa en torno a los 3°C durante la noche. La estratificación térmica diurna tiene varios efectos. La diferencia de temperaturas provoca que los paneles fotovoltaicos tengan diferentes rendimientos, y, por tanto, diferentes producciones, provocando posibles desequilibrios en la red. Además, la energía transferida al edificio en el parte superior es diferente a la transferida en la parte inferior debido a las diferencias en el salto térmico. En contraposición, la estratificación térmica nocturna no se considera influyente, ya que durante la noche no existe producción fotovoltaica y las Medidas de Ahorro Energético (MAEs) que se propondrán son solo diurnas.

Como se ha dicho previamente, en el modelo se supone una temperatura homogénea en la doble piel. Esto simplifica ampliamente los cálculos y evita utilizar un programa de simulación para conocer la temperaturas. El cálculo se va a realizar promediando las temperaturas en las diferentes plantas.

Se trata de una hipótesis conservadora ya que para las Medidas de Ahorro Energético (MAEs) que se propondrán no se tendrá en cuenta el efecto

beneficioso que produce la estratificación ya que se pueden escoger los puntos más calientes para la extracción de aire disminuyendo así la temperatura en la cámara aumentando el rendimiento de los fotovoltaicos y reduciendo las pérdidas energéticas con el exterior. Aun así, en el futuro, al incluir una corriente de aire, se espera reducir ampliamente este fenómeno de modo que el modelo se acercará más al comportamiento futuro.

### 3.2. Validación del modelo

Una vez concluido como se estudiará la temperatura en la doble piel se debe ver como ésta evoluciona en función de las variables exteriores, y ver si el modelo propuesto representa de forma correcta la realidad.

A continuación se presenta una gráfica comparando las temperaturas en la doble piel con aquellas obtenidas mediante el modelo a través de las condiciones externas y la temperatura en el interior del edificio.

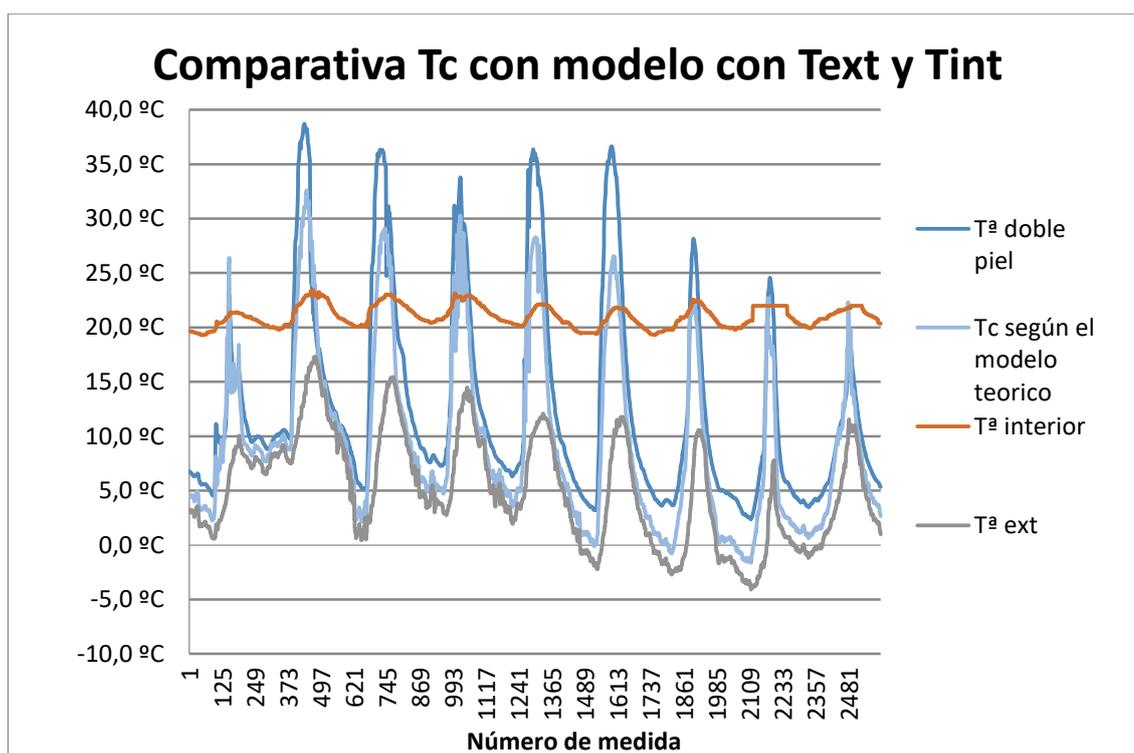


Figura III.118 Comparativa Tc con modelo con Text y Tint

Cuando durante el día aumenta la radiación la temperatura sube, llegando a más de 30°C, temperatura suficiente para que el aire pueda ser introducido al interior del edificio calentando las salas con demanda de calefacción. Durante la noche la temperatura desciende situándose entre la temperatura exterior y la del interior del edificio.

Si solo se representa la temperatura real y la del modelo:

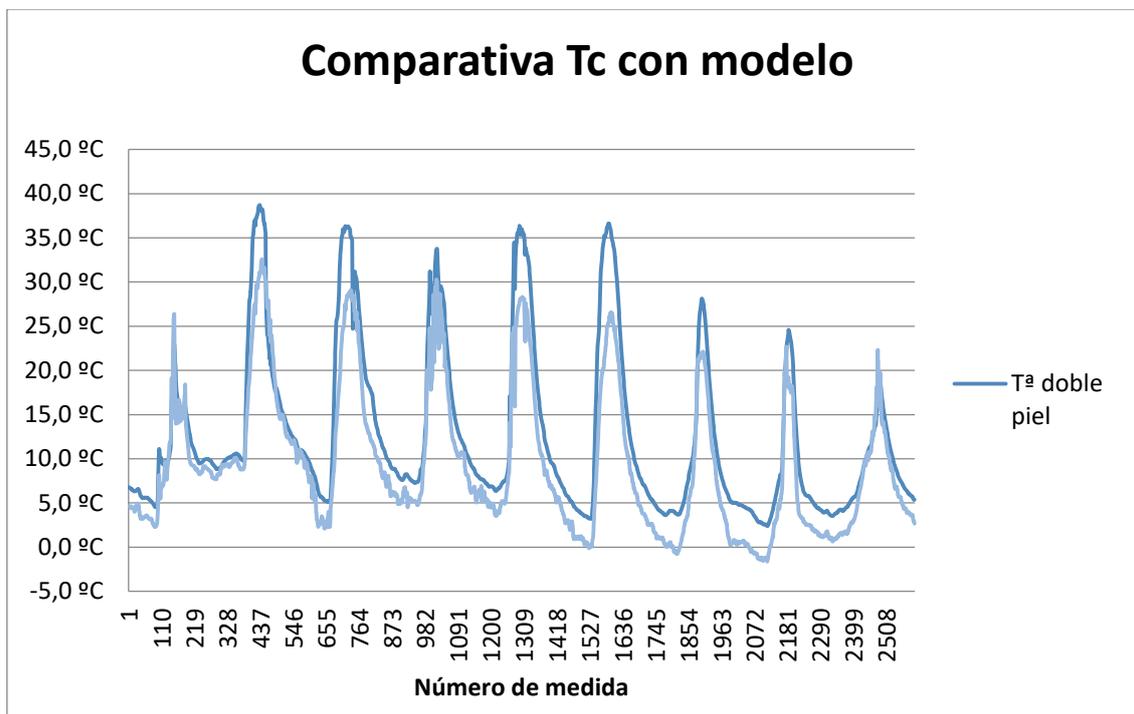


Figura III.119 Comparativa Tc con modelo

Como se puede observar, el modelo describe adecuadamente el comportamiento de la doble piel. Cabe destacar que la predicción del modelo es, en prácticamente todo momento, inferior a la real. Esto es un punto a favor ya que temperaturas más altas en la doble piel son más favorables para poder circular aire al edificio y para obtener peores rendimientos de fotovoltaicos (de modo que sean más susceptibles de mejora). Al utilizar el modelo se sabrá con seguridad que el potencial de mejora es aún mayor que el resultado del modelo, por tanto, se define como un modelo conservador y se valida.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

### Fuentes bibliográficas

---

- [1] Crespo, A. *“Mecánica de fluidos”*. Editorial Parafino. ISBN 9-78-84-97322928. Madrid, 2006.
- [2] Reynolds, W. *“Termodinámica”*. Editorial Mc Graw Hill. ISBN 0-07-0520383. México, 1976.
- [3] Shapiro, M. *“Fundamentos de termodinámica técnica”*. Editorial Reverté. ISBN 9-78-84-29143133. EEUU, 2004.
- [4] Rey, F.J., San José, J.F., Velasco, E., Tejero, A., Andrés, M. *“Libro de apuntes de ingeniería térmica”*. Editorial Grupo de Termotecnia de la Universidad de Valladolid. ISBN 84-617-1729-5. Valladolid, 2014.
- [5] Rey, F.J., San José, J.F. *“Ecuaciones, gráficas y tablas calor y frío industrial”*. Editorial Grupo de Termotecnia de la Universidad de Valladolid. ISBN 84-87079-18-0. Valladolid, 1992.
- [6] Incropera, F.P., De Witt D.P. *“Fundamentos de transferencia de Calor”*. Editorial Pearson Prentice Hall. ISBN 970-17-0170-4. México, 1999.
- [7] *“Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura”*. PET-REV. Octubre, 2002.
- [8] Raznjevic, K., *“Handbook of thermodynamic tables and charts”*. Editorial Mcgraw Hill. ISBN 0-07-051270-1. Nueva York, 1976.
- [9] *“Código técnico de la edificación web”*, 2007.
- [10] Maggi, S.A. TFC. *“Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile”*. Universidad de Chile. Santiago de Chile, 2013.
- [11] Bejan, A. *“Convection heat transfer”*. Editorial Wiley-Interscience. ISBN 0-471-89612-8. EEUU, 1984.

### Referencias en páginas web

---

- [W1] Escritos científicos. Eje de la Tierra.  
<http://www.escrioscientificos.es/trab21a40/solvillanueva/pagina02.htm>. Última consulta 18/05/2016.

---

## TABLAS

---

Tabla III.1 Resumen de variables y ecuaciones en el problema general .....	157
Tabla III.2 Resumen de variables y ecuaciones tras simplificaciones.....	158
Tabla III.3 Resumen de ecuaciones diferenciales del análisis del campo fluido .....	161
Tabla III.4 Zonas en la doble piel.....	176
Tabla III.5 Criterios exclusivos de $K_{Sol}$ .....	182
Tabla III.6 absortividad.....	183
Tabla III.7 $K_{\alpha\beta}$ .....	184
Tabla III.8 $K_{Sol,i}$ .....	185
Tabla III.9 Resistencias interior y exterior de cada cerramiento.....	191
Tabla III.10 Constantes $B_i$ y $C_i$ .....	192
Tabla III.11 Transmitancia .....	194
Tabla III.12 $K_{c, i}$ .....	194
Tabla III.13 $K_c$ .....	195

---

## FIGURAS

---

Figura III.1 Cubo diferencial de materia en coordenadas cartesianas .....	150
Figura III.2 Flujo de calor específico en dirección x.....	151
Figura III.3 eración de energía por unidad de volumen y tiempo .....	152
Figura III.4 Representación de la capacidad calorífica de un elemento diferencial .....	152
Figura III.5 Capa límite térmica y gradiente generado .....	155
Figura III.6 Capa límite dinámica superpuesta con capa límite térmica.....	155
Figura III.7 Tipos de capa límite en función de la naturaleza del flujo.....	156
Figura III.8 Elemento diferencial para el balance de masa .....	158
Figura III.9 Elemento diferencial para el balance de masa .....	166
Figura III.10 Ejemplo de dos superficies radiantes .....	168
Figura III.11 cambio de ángulo de incidencia .....	172
Figura III.12 cambio de ángulo de incidencia [W1] .....	172
Figura III.13 Ángulo de inclinación, $\beta$ .....	174
Figura III.14 Azimut $\alpha$ .....	174
Figura III.15 Corrección por ángulo de inclinación y acimut [7] .....	175
Figura III.16 Zona trasera interior (zona 1) .....	177
Figura III.17 Zona delantera vidriada y con fotovoltaicos (zonas 2 y 3).....	177
Figura III.18 Detalle de un panel (zonas 2 y 3) .....	178
Figura III.19 Zona lateral derecha (zona 4).....	178
Figura III.20 Zona superior (zona 5) .....	179
Figura III.21 Zona lateral izquierda (zona 6) .....	179
Figura III.22 Zona trasera exterior (zona 7).....	180
Figura III.23 Zona inferior (zona 8) .....	180
Figura III.24 modelización .....	182
Figura 0-25 .....	184
Figura III.26 Cálculo del factor de corrección .....	184
Figura III.27 Temperaturas en la pared .....	186
Figura III.28 Resistencias en la pared .....	187
Figura III.29 Calor en la pared.....	188
Figura III.30 Balance en la cámara.....	192
Figura III.31 Temperaturas en el piso 3 .....	197
Figura III.32 Temperatura en diferentes plantas.....	198
Figura III.33 Comparativa Tc con modelo con Text y Tint.....	199
Figura III.34 Comparativa Tc con modelo.....	200

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

---

# CAPÍTULO IV: MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO

---

## ÍNDICE CAPÍTULO IV

<b>1. PROPUESTA DE MEJORA .....</b>	<b>207</b>
1.1. FUNCIONAMIENTO ACTUAL .....	207
1.2. MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO (MAEs) .....	211
1.3. RECIRCULACIÓN INTERNA EN INVIERNO.....	217
<b>2. EVALUACIÓN DE AHORROS EN CALEFACCIÓN .....</b>	<b>218</b>
2.1. VERIFICACIÓN DE MODO DE FUNCIONAMIENTO .....	218
2.2. MODELO CON RECIRCULACIÓN .....	219
2.3. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE VENTILACIÓN .....	224
2.4. EVALUACIÓN DE AHORROS DE CALEFACCIÓN .....	229
2.5. COP DE LA INSTALACIÓN .....	231
<b>3. EVALUACIÓN DE MEJORA DEL RENDIMIENTO DEL FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>232</b>
3.1. PÉRDIDA DE RENDIMIENTO CON LA TEMPERATURA .....	232
3.2. MEJORA DEL RENDIMIENTO .....	233
3.3. MEJORA EN EL COP DE INSTALACIÓN.....	234
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>236</b>
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	236
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB .....	236

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

---

# 1. PROPUESTA DE MEJORA

---

En el apartado anterior se validaron las ecuaciones que reflejan el comportamiento de la doble piel. Una vez hecho esto, es el momento de empezar a plantear qué medidas proponer para mejorar el comportamiento actual.

## 1.1. Funcionamiento actual

---

Antes de proponer medidas de ahorro lo primero que se ha de realizar es un breve estudio del comportamiento actual. Existen dos modos de funcionamiento: verano e invierno. El modo de verano se activa cuando la temperatura de la doble piel se incrementa por encima de una temperatura de consigna. Cuando esto ocurre, las compuertas inferior y superior se abren cuando la temperatura exterior está 2°C por debajo de la temperatura del interior de la doble piel, creando un flujo de aire que refrigera la doble piel. Por el contrario, si esta temperatura de consigna no se ha alcanzado, se activa el modo de invierno. En este modo, se cierran las compuertas y no se permite la salida de aire al exterior ni la entrada de aire exterior a la doble piel salvo cuando la temperatura exterior está 2°C por encima de la temperatura del interior de la doble piel, temperatura a la cual se abren las compuertas.

El funcionamiento se recoge en la siguiente tabla:

Tabla IV.47 Modos de funcionamiento

Modo	Condición	Funcionamiento
Verano	Temperatura exterior mayor a 18,4°C	Se abren las compuertas cuando la temperatura exterior está 2°C por debajo de la temperatura del interior de la doble piel
Invierno	Temperatura exterior menor a 18,4°C	Se abren las compuertas cuando la temperatura exterior está 2°C por encima de la temperatura del interior de la doble piel

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

En las imágenes siguientes se puede ver en funcionamiento con las compuertas cerradas y abiertas. Primero se mostrará el comportamiento con puertas abiertas:

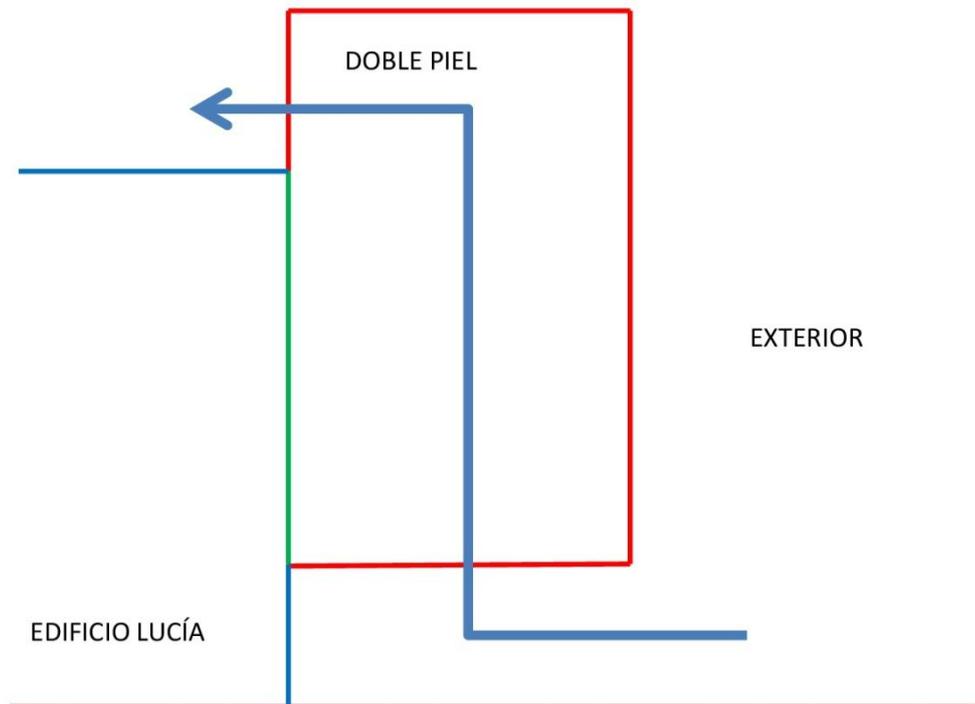


Figura IV.120 Con circulación

A continuación se muestra el comportamiento con puertas cerradas, donde no hay flujo de aire en la doble piel:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

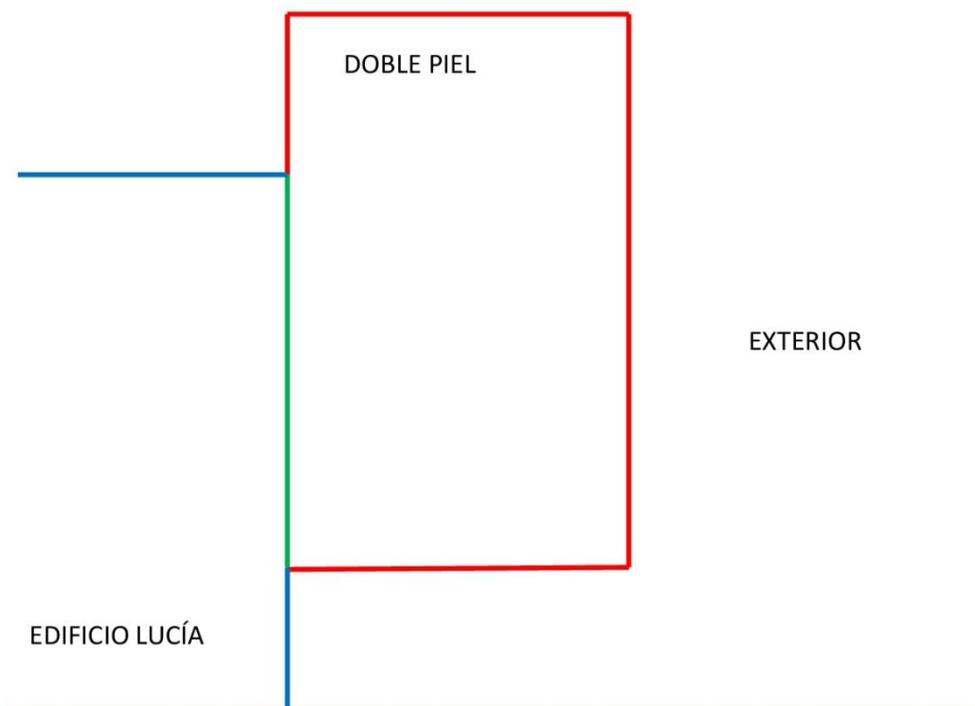


Figura IV.121 Sin circulación

Si la doble piel se encuentra en modo de invierno, durante las mañanas la temperatura de la doble piel aumenta, debido no solo al aumento de la temperatura exterior si no también a la radiación solar que incide sobre la misma. Cuando el Sol alcanza su zenit, la temperatura en la doble piel suele alcanzar sus máximos, para acabar reduciéndose durante la tarde. Por la noche la temperatura sigue bajando, pero esta bajada es suave en comparación con la de la tarde.

Dentro del periodo de medida se registró este comportamiento. El ejemplo que se muestra a continuación se corresponde con el día 23 de noviembre de 2015:

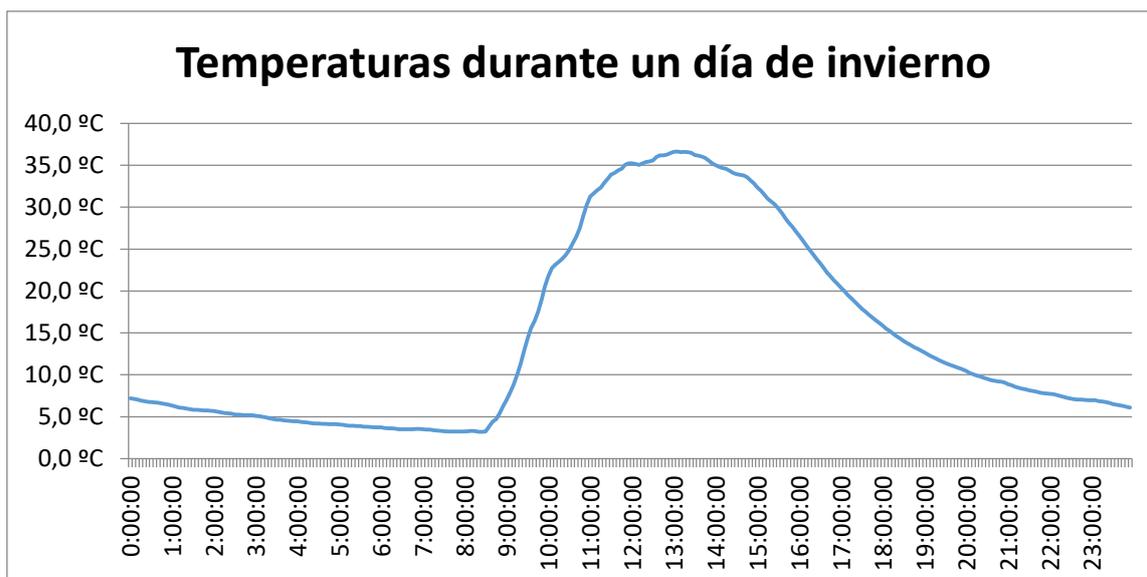


Figura IV.122 Temperaturas durante un día de invierno

Si la piel se encuentra en modo de verano el comportamiento varía. Durante las mañanas la temperatura de la doble piel aumenta, pero si en algún momento se sobrepasa la temperatura de consigna de las compuertas estas se abren, al entrar aire del exterior a menor temperatura la temperatura de la cámara desciende. Cuando por las tardes la temperatura exterior disminuye se vuelve a alcanzar la temperatura de consigna de nuevo y éstas se cierran. Durante el resto de la tarde la temperatura continúa recudiéndose. Por la noche la temperatura sigue bajando, pero esta bajada es suave en comparación con la de la tarde.

Dentro del periodo de medida se registró este comportamiento. El ejemplo que se muestra a continuación se corresponde con el día 8 de noviembre de 2015:



Figura IV.123 Temperaturas durante un día de verano

En la imagen superior se puede observar que la temperatura a las 11:00 disminuye drásticamente. Este punto coincide con la apertura de las compuertas.

Este funcionamiento se establece así ya que al estar la cámara caliente ésta transfiere calor al edificio cuando éste demanda frío, aumentando de este modo el consumo de refrigeración. Además, en la doble piel se encuentran los fotovoltaicos que pierden rendimiento al aumentar la temperatura.

## 1.2. Medidas de Ahorro Energético (MAEs)

---

Como se puede ver, ya existen estrategias para mejorar la operación de la doble piel. Aún así, todavía existe margen de mejora. A continuación se expondrán las estrategias de mejora para los meses de invierno y verano.

### Mejoras en invierno

---

Durante el invierno se podría introducir el aire caliente de la doble piel al edificio. Al introducir aire el caliente se reducirían las necesidades de calefacción del edificio. Además, se produce un efecto beneficioso en los fotovoltaicos, ya que estos se encontrarían a menor temperatura, que como se ha explicado con anterioridad, mejora su rendimiento.

Esta mejora plantea dos alternativas. La primera de ellas consiste en introducir aire del exterior del edificio. La energía introducida al edificio depende de dos factores, del caudal y de la temperatura de aire. Cuanto más frío sea el aire introducido a la doble piel, más se reducirá la temperatura del

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

aire en la cámara. Si se quiere introducir aire al interior del edificio a la misma temperatura (aquella que se considere de confort) se deberá reducir el caudal de aire a introducir tanto a la doble piel, como al edificio, ya que al fin y al cabo, todo el aire que se introduce en la doble piel coincide con el que se suministra al edificio.

Además, al ser aire externo, se podría considerar como aire "limpio", que traería consigo una reducción de caudales de ventilación. Sin embargo, con el sistema solo se controlaría la temperatura de impulsión, dejando descuidada la humedad del aire. En la realidad, bajo las condiciones de humedad en Valladolid, no sería necesario humectar o deshumectar en la mayoría de los casos. Aún así, en caso de querer controlar las condiciones del aire sería necesaria una Unidad de tratamiento de Aire (UTA) posterior. Se podría colocar una UTA que estuviera localizada a la salida de la doble piel, o bien utilizar la del edificio, pero para lo segundo sería necesario una nueva red de tuberías, ya que ahora mismo el Edificio Lucía no posee una preparadas para conectarse a la doble piel.

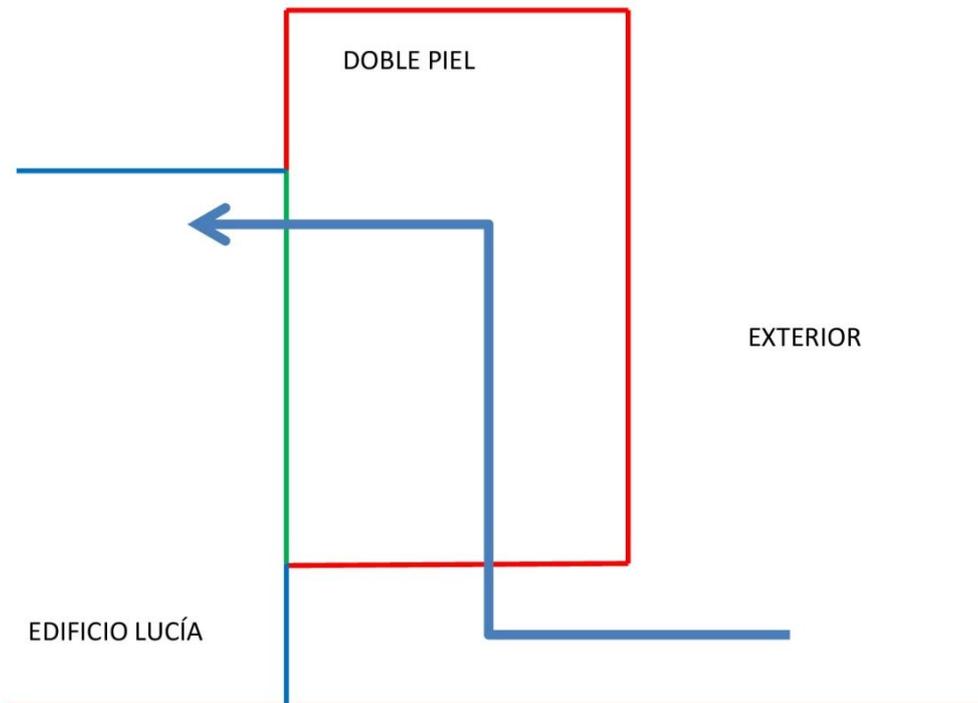


Figura IV.124 Utilizar aire del exterior del edificio

La segunda alternativa consiste en introducir aire del interior del Edificio Lucía. Éste, al estar más caliente, aumentaría el caudal de aire a introducir al edificio, ya que si no se aumentara el caudal, aumentarían las temperaturas

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

del aire en la doble piel (caso contrario al anterior). Sin embargo, al ser aire de dentro del edificio, la humedad del aire ya ha sido previamente controlada. Para poder controlar las condiciones higrotérmicas del aire ya no sería necesaria una Unidad de tratamiento de Aire (UTA) posterior y se podría introducir directamente. Esto implica un ahorro de costes en su implementación y una mayor sencillez en el diseño al no presentar la humedad como variable a estudiar.

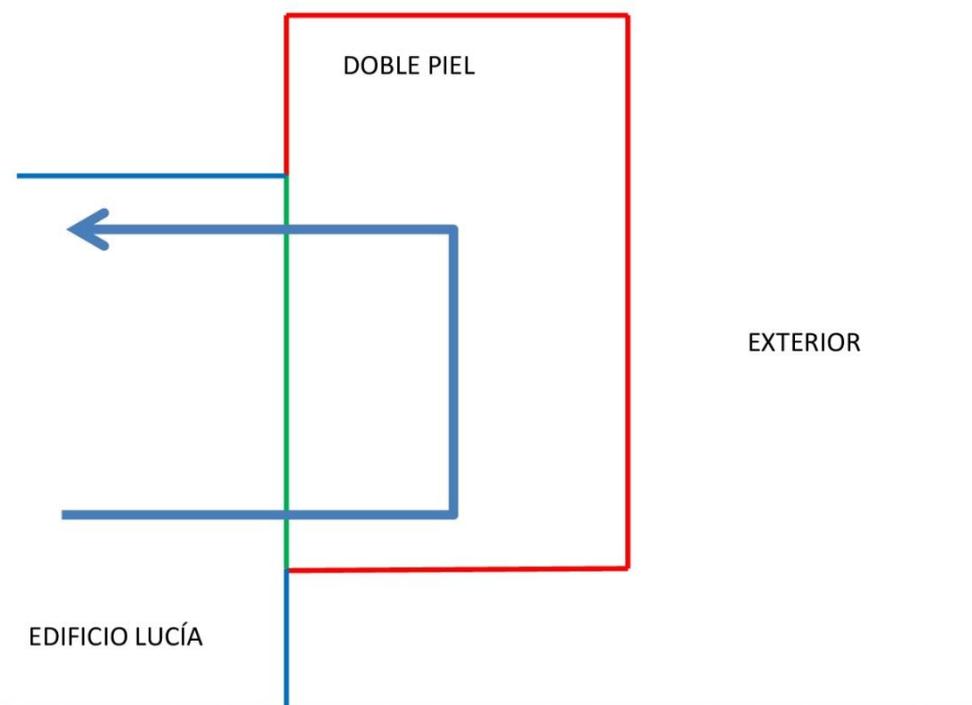


Figura IV.125 Utilizar aire del interior del edificio

La tercera y última posibilidad consistiría en combinar las dos anteriores. Aprovechar el aire más frío del exterior y la posibilidad de utilizar el aire interior en mejores condiciones de humedad. Este sería el sistema más difícil de estudiar ya que presenta como variable también la humedad. Sin embargo, este sistema supondría la solución más eficiente en cada momento pudiendo ser rentable.

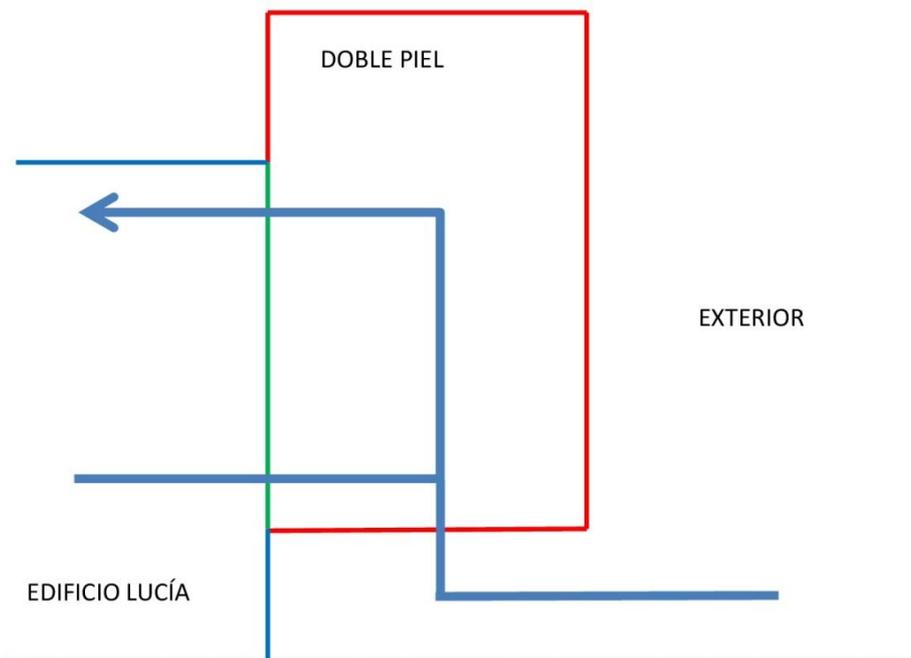


Figura IV.126 Utilizar aire del interior y exterior del edificio

## Mejoras en verano

---

En verano no existe demanda de calefacción, de modo que no es posible introducir el aire caliente de la doble piel al interior del edificio. Sin embargo, se procura que la temperatura de la doble piel sea lo más baja posible para favorecer la producción fotovoltaica. En esta línea se proponen las mejoras al sistema actual, rebajar al máximo posible la temperatura en la cámara mediante enfriamiento evaporativo. Para ello se contarían con unos aspersores de agua que rociarían el aire que entra en la cámara, disminuyendo así su temperatura.

De nuevo se plantean aquí varias posibilidades. La primera de ellas consiste en introducir aire exterior. Al entrar el aire en la cámara éste pasaría por el equipo de enfriamiento evaporativo reduciendo así su temperatura. Esta posibilidad no supondría inversiones en nuevos equipos de ventilación ya que simplemente habría que colocar el sistema de enfriamiento evaporativo.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

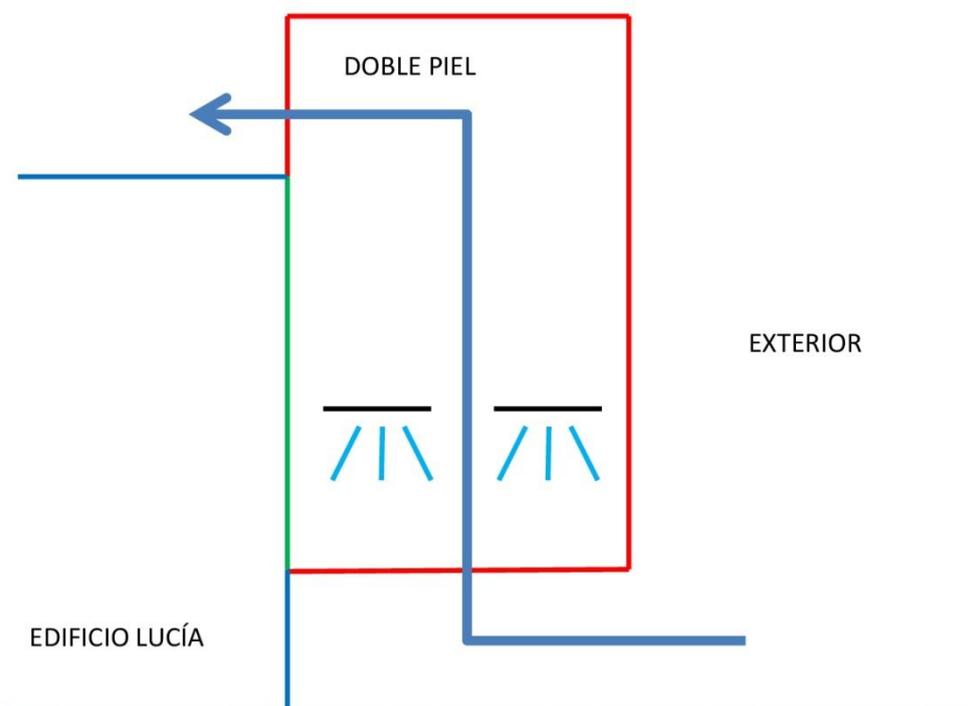


Figura IV.127 Utilizar aire del exterior del edificio

La segunda opción sería utilizar aire del interior del edificio. Esta opción tiene como ventaja que la temperatura en el interior del edificio en periodo de verano es menor y, por tanto, se conseguiría reducir aún más la temperatura de los fotovoltaicos. Además, todavía existiría potencial de reducción de la temperatura del aire de entrada a la doble piel mediante enfriamiento evaporativo, si bien hay que decir que dado el clima de Valladolid, con unos veranos secos, este potencial sería menor que en el caso de introducir aire del exterior. En contraposición, esta posibilidad supondría inversiones en nuevos equipos de ventilación. Sin embargo, si se combina el sistema de recirculación de aire en invierno con este sistema, no serían necesarias inversiones extra ya que los equipos necesarios para ambos sistemas serían los mismos.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

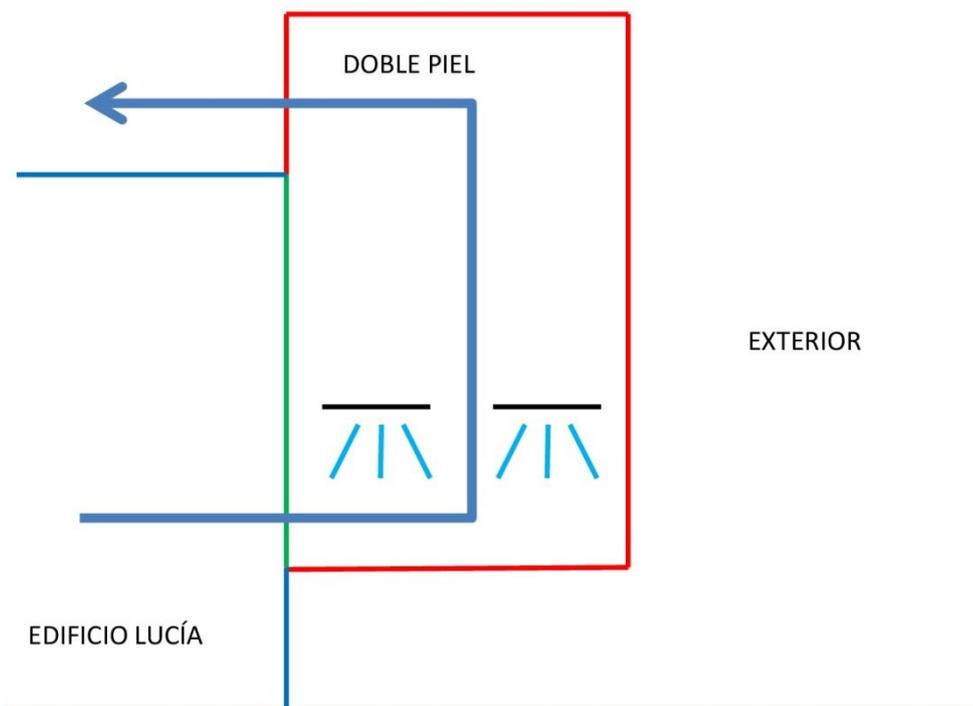


Figura IV.128 Utilizar aire del interior del edificio

La tercera y última posibilidad consistiría en combinar las dos anteriores. Aprovechar el aire más frío del interior del edificio y la posibilidad de enfriamiento evaporativo del aire exterior. Este sería el sistema más caro de todos ya que serían necesarios ambos equipos. Sin embargo, este sistema supondría la solución más eficiente en cada momento pudiendo ser rentable.

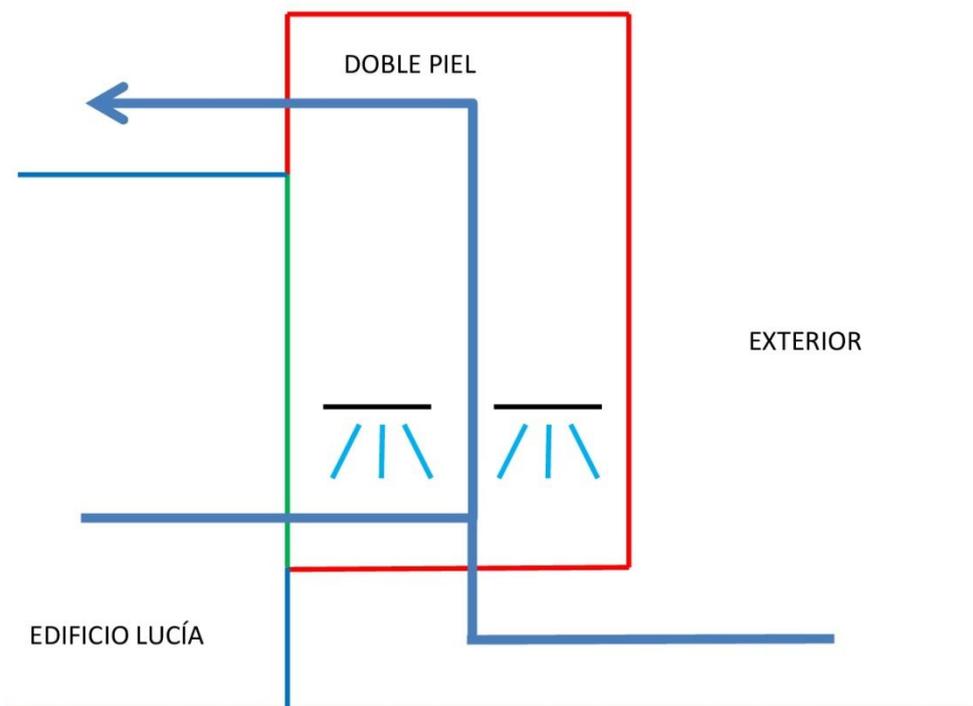


Figura IV.129 Aprovechar el aire más frío del interior del edificio y la posibilidad de enfriamiento evaporativo del aire exterior

Todas las opciones aquí presentes podrían ser evaluadas como Medidas de Ahorro Energético (MAEs). Sin embargo, en el desarrollo de este TFG solo se estudiará la opción de recircular aire del interior del Edificio Lucía en periodo de invierno, proponiendo las demás como futuros desarrollos.

### 1.3. Recirculación interna en invierno

---

En los apartados siguientes se estudiará el nuevo comportamiento de la doble piel cuando se recircule aire. Este nuevo comportamiento implica modificaciones en la temperatura de la doble piel, en la energía introducida al edificio mediante conducción, en la temperatura de los fotovoltaicos... Sumado a esto habrá un nuevo flujo de calor asociado a la transferencia de masa que habrá de ser cuantificado.

Todos estos cambios implicarán un cambio en la energía térmica entregada al edificio, pero también modificarán la potencia de los fotovoltaicos. Por ello, ambos fenómenos serán estudiados reservando un apartado diferente para cada uno de ellos.

## 2. EVALUACIÓN DE AHORROS EN CALEFACCIÓN

Como se ha comentado con anterioridad, en este TFG solo se desarrollará el estudio de la recirculación de aire de dentro del Edificio Lucía a través de la doble piel. Esto traerá consigo dos mejoras: una en calefacción y otra en producción fotovoltaica. En este apartado se comenzará evaluando la mejora energética asociada a calefacción.

### 2.1. Verificación de modo de funcionamiento

Lo primero que se ha de realizar es verificar que durante las medidas realizadas se cumplan los requisitos del modo de funcionamiento en los que se va a realizar el estudio. Este es el modo de invierno, para el cual la temperatura exterior tiene que ser inferior a 18,4°C. Para ello se utilizará la siguiente gráfica:

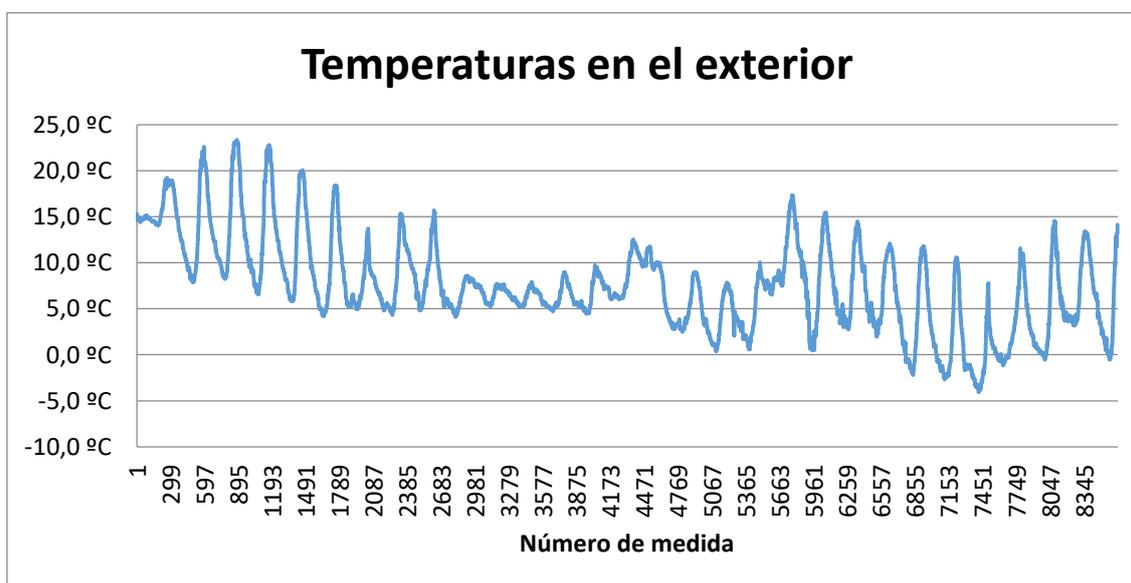


Figura IV.130 Temperaturas en el exterior

Todos aquellos días en los que se haya llegado a temperaturas superiores a 18,4°C serán eliminados.

En nuestro caso esto se corresponde con los primeros días del periodo:

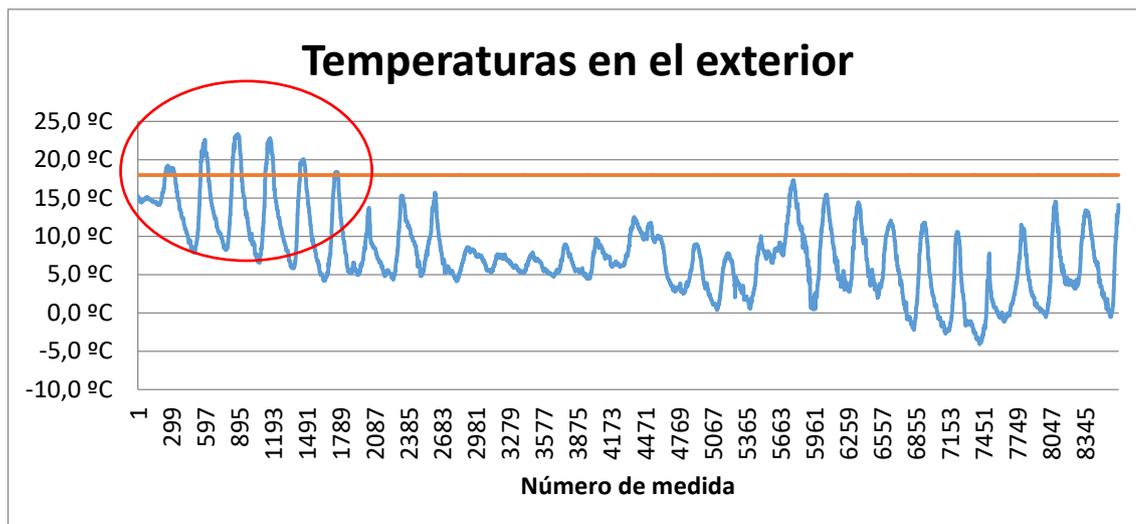


Figura IV.131 Temperaturas en el exterior

Se puede ver que hay varios días que no cumplen con la condición de temperatura necesaria, por tanto, estos días se eliminaron, reduciendo el periodo de estudio inicial desde el 5 de noviembre a las 15:00, hasta el 5 de diciembre a las 15:00, a un nuevo periodo de 23 días desde el 12 de noviembre a las 15:00 hasta el 5 de diciembre a las 15:00.

Donde se puede observar que todos los calores cumplen con la condición del modo de funcionamiento.

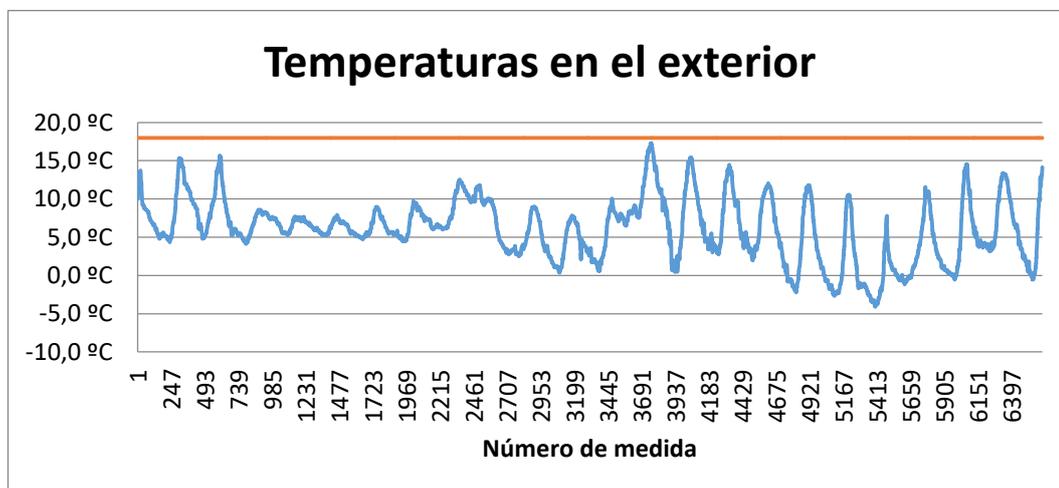


Figura IV.132 Temperaturas en el exterior

## 2.2. Modelo con recirculación

En caso de que se circule aire del interior de la cámara hacia el interior del edificio, el calor que pasa al interior del edificio será diferente. Por ello, será necesario volver a realizar los balances de energía a la doble piel para

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

determinar la cantidad de energía que se está ganando cuando se circula aire hacia el interior del edificio.

Si se vuelve a realizar un análisis a la pared exterior se obtienen de nuevo los mismos resultados, de modo que el calor que pasará al interior de la cámara seguirá siendo:

$$Q_{int} = \left( \sum_2^6 C_i \right) Q_{sol} + \left( \sum_2^8 B_i \right) * T_{ext} - \left( \sum_2^8 B_i \right) * T_c \quad (E-III.91)$$

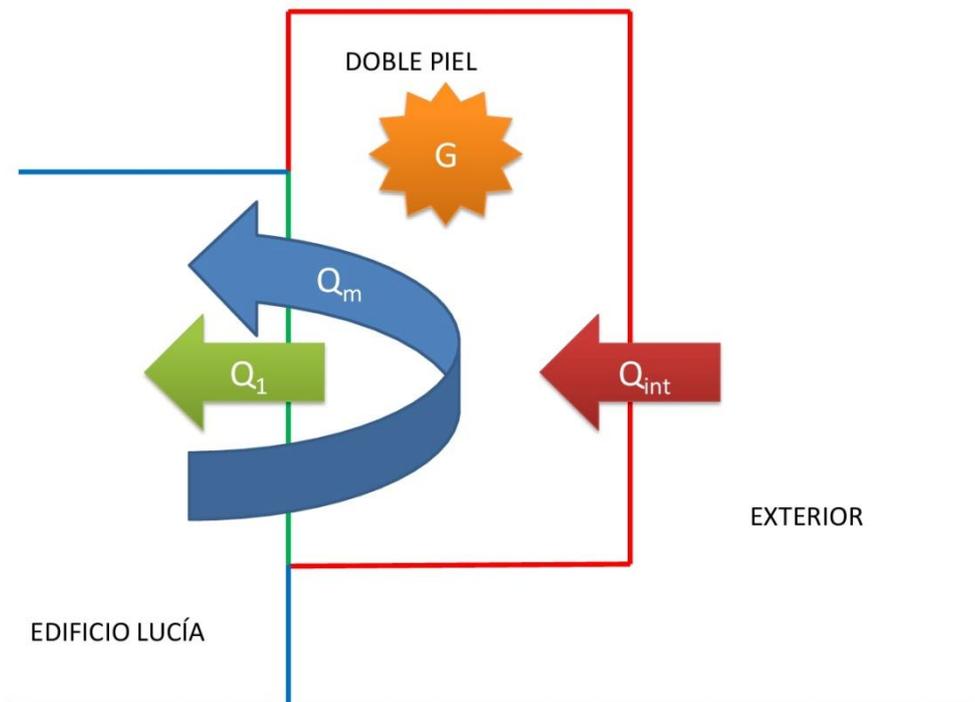
Nótese que aunque la fórmula sea la misma el resultado variará respecto del obtenido en el caso sin recirculación ya que la temperatura en la cámara no será la misma.

Al realizar un balance a la cámara no se obtendrá la misma ecuación ya que se debe tener en cuenta un nuevo intercambio energético, correspondiente a la diferencia de energías entre el aire que entra y sale de la cámara. A este flujo se le denominará  $Q_m$  y se define como:

$$Q_m = \dot{m} * C_p * (T_c - T_{int}) \quad (E-III.92)$$

Siendo  $\dot{m}$  el flujo de masa circulado.

Así, la cámara quedará modelada como:



**Figura IV.133 Modelo con recirculación**

Con la misma notación que la utilizada anteriormente.

Si realizamos un balance se obtiene:

$$Q_1 + Q_m = G + Q_{int} \quad (\text{E-III.93})$$

Como se hizo en el caso anterior, a partir del balance en la cámara se obtendrá la expresión que relaciona la temperatura en la cámara con la radiación incidente las temperaturas en la cámara y en el exterior, además, en este caso se tiene otra variable, el flujo de masa que circula por la cámara:

$$T_c = \frac{[K_c + (\sum_2^6 C_i)] Q_{sol} + (\sum_2^8 B_i) T_{ext} + (\dot{m} * C_p + B_1) * T_{int}}{[(\sum_1^8 B_i) + \dot{m} * C_p]} \quad (\text{E-III.94})$$

El calor ganado por el Edificio Lucía será la suma del ganado por el flujo de masa y del ganado por diferencia de temperaturas entre la cámara y el interior:

$$Q_g = Q_1 + Q_m \quad (\text{E-III.95})$$

Si expresamos el calor ganado en función de la radiación incidente, las temperaturas en la cámara y en el exterior, y el flujo de masa que circula por la cámara:

$$Q_g = \frac{[K_c + (\sum_2^6 C_i)] * (\dot{m} * C_p + B_1)}{[(\sum_1^8 B_i) + (\dot{m} * C_p)]} * Q_{sol} + \frac{(\sum_2^8 B_i) * (\dot{m} * C_p + B_1)}{[(\sum_1^8 B_i) + (\dot{m} * C_p)]} * T_{ext} - \frac{(\sum_2^8 B_i) * (\dot{m} * C_p + B_1)}{[(\sum_1^8 B_i) + (\dot{m} * C_p)]} * T_{int} \quad (\text{E-III.96})$$

Si se quiere saber cuál será el máximo calor ganado respecto del flujo de masa, habrá que derivar ente respecto del flujo de masa e igualarlo a cero:

$$\frac{dQ_g}{d\dot{m}} = 0 \quad (\text{E-III.97})$$

La derivada del calor ganado respecto del flujo de masa es:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

$$\begin{aligned} \frac{dQ_g}{d\dot{m}} = & \frac{[K_c + (\sum_2^6 C_i)] * (\sum_2^8 B_i) * C_p}{[(\sum_1^8 B_i) + (\dot{m} * C_p)]^2} * Q_{Sol} \\ & + \frac{(\sum_2^8 B_i)^2 * C_p}{[(\sum_1^8 B_i) + (\dot{m} * C_p)]^2} * T_{ext} \\ & - \frac{(\sum_2^8 B_i)^2 * C_p}{[(\sum_1^8 B_i) + (\dot{m} * C_p)]^2} * T_{int} \end{aligned} \quad (E-III.98)$$

En el caso que nos atañe, la regulación del flujo de masa se realizará mediante la temperatura en la cámara. Esta temperatura será la misma a la que se impulse el aire al interior del local, de modo que solo será interesante introducir aire al edificio si éste está más caliente que el del local, ya que, en caso contrario, se estaría refrigerando.

Por esta razón parece lógico encontrar el punto de máximo calor ganado en función de la temperatura en la cámara. Si se expresa la derivada del calor ganado respecto del flujo de masa en función de la temperatura en la cámara se obtiene:

$$\frac{dQ_g}{d\dot{m}} = [(\sum_1^8 B_i) + (\dot{m} * C_p)] * (T_c - T_{int}) = 0 \quad (E-III.99)$$

Esta expresión está compuesta por dos términos. El primero, depende del flujo de masa que será circulado y siempre será positivo, ya que el flujo de masa no puede tomar valores negativos. Además se observa que es un término que siempre crece al aumentar el flujo de masa cuando la temperatura de la cámara es mayor que la interior. Por tanto, siempre que se aumente el flujo de masa se conseguirá una ganancia de calor si la temperatura de la cámara es mayor que la interior.

El segundo será cero para:

$$T_c = T_{int} \quad (E-III.100)$$

De este modo, se puede concluir que existe un máximo para el calor ganado que coincide con que la temperatura en la cámara sea igual a la del interior. Sin embargo, en la realidad existe el condicionante previamente mencionado de que la temperatura en la cámara tiene que ser superior a la del interior para calefactar. Esto se traduce en que la temperatura en la cámara deberá ser lo más parecida posible a la interior pero siempre superior.

$$T_c > T_{int} \quad (E-III.101)$$

Lo último que queda por conocer es la diferencia entre el calor ganado cuando no hay recirculación y el calor ganado cuando si la hay. De este modo se puede cuantificar la mejora producida al recircular.

La diferencia expresada en función de las condiciones exteriores, la temperatura del edificio y el flujo de masa recirculado es:

$$Q_g - Q_1 = \left\{ \left[ K_c + \left( \sum_2^6 C_i \right) \right] * Q_{Sol} + \left( \sum_2^8 B_i \right) * (T_{ext} - T_{int}) \right\} * \left\{ \frac{\left( \sum_2^8 B_i \right) * (\dot{m} * C_p)}{\left( \sum_1^8 B_i \right)^2 + \left( \sum_1^8 B_i \right) * (\dot{m} * C_p)} \right\} \quad (E-III.102)$$

Se observa que hay dos términos claramente diferenciados. El primero hace referencia a las condiciones exteriores y del edificio. El segundo hace referencia al flujo de masa que se recircula.

Tabla IV.48 Términos de la ecuación

$\left[ K_c + \left( \sum_2^6 C_i \right) \right] * Q_{Sol} + \left( \sum_2^8 B_i \right) * (T_{ext} - T_{int})$	$\frac{\left( \sum_2^8 B_i \right) * (\dot{m} * C_p)}{\left( \sum_1^8 B_i \right)^2 + \left( \sum_1^8 B_i \right) * (\dot{m} * C_p)}$
Primer término	Segundo término

Se empezará a analizar el segundo término, el cual depende del flujo de masa. El valor más pequeño que puede tomar el flujo de masa es cero ya que no puede tomar valores negativos, para este valor el calor ganado es cero. A medida que se aumenta el flujo de masa este término siempre aumenta, siendo siempre este término positivo, llegando a un valor máximo de:

$$\frac{\left( \sum_2^8 B_i \right)}{\left( \sum_1^8 B_i \right)} \quad (E-III.103)$$

Que se conseguiría con un flujo másico infinito.

Dentro del primer término se observa que el aporte de la radiación es siempre positivo, mientras que las condiciones interna y externa aportan de forma negativa ya que en invierno:

$$T_{ext} < T_{int} \Rightarrow T_{ext} - T_{int} < 0 \quad (E-III.104)$$

Para que este término sea positivo por tanto es necesaria que se dé la condición:

$$\left[ K_c + \left( \sum_2^6 C_i \right) \right] * Q_{Sol} > \left( \sum_2^8 B_i \right) * (T_{int} - T_{ext}) \quad (E-III.105)$$

Esta condición se puede expresar en términos de temperatura interior y de la cámara. Tras operar se obtiene:

$$T_c > T_{int} \quad (\text{E-III.106})$$

De modo que esta condición ya recoge la condición previa de que la temperatura en la cámara sea mayor y no es necesario introducir una condición a mayores.

Al ser el segundo término siempre positivo esta condición es la única necesaria para que se pueda recircular aire al interior del edificio cumpliendo así el objetivo de reducción de consumo de calefacción.

### 2.3. Selección del equipo de ventilación

---

Como se puede observar en las ecuaciones propuestas con anterioridad, hay una variable nueva respecto al caso sin recirculación, el flujo másico recirculado ( $\dot{m}$ ), que hay que definir para establecer el ahorro producido por la recirculación en el edificio.

A la hora de evaluar los ahorros, el flujo de masa solo se encuentra en el segundo término de la ecuación de la mejora de calor de calefacción, por tanto, será este término el que se ha de maximizar:

$$\frac{(\sum_2^8 B_i) * (\dot{m} * C_p)}{(\sum_1^8 B_i)^2 + (\sum_1^8 B_i) * (\dot{m} * C_p)} \quad (\text{E-III.107})$$

Como se ha dicho antes, el valor máximo que puede alcanzar este término es:

$$\frac{(\sum_2^8 B_i)}{(\sum_1^8 B_i)} \quad (\text{E-III.108})$$

Que en el estudio de la doble piel se corresponde con un valor de:

$$\frac{(\sum_2^8 B_i)}{(\sum_1^8 B_i)} = 0,91 \quad (\text{E-III.109})$$

Con anterioridad también se ha comentado que este valor máximo se alcanzaría con un caudal infinito. En la realidad alcanzar este valor es imposible, se ha de llegar a una solución de compromiso entre una recuperación térmica razonable a base de un caudal que no sea excesivo, ya que un ventilador más grande implicaría una mayor inversión y mayor consumo energético.

Para poder decidir el caudal de recirculación se estudiará el porcentaje de recuperación térmica sobre el máximo alcanzable (%), definido como la recuperación que se alcanza entre la máxima alcanzable:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

$$\% = \frac{Q_g}{Q_{g,max}} * 100 \quad (\text{E-III.110})$$

Finalmente, si se simplifica, el término obtenido es:

$$\% = \frac{(\dot{m} * C_p)}{(\sum_1^8 B_i) + (\dot{m} * C_p)} * 100 \quad (\text{E-III.111})$$

Este porcentaje recuperado sobre el máximo es una función que solo tiene como variable el flujo másico ( $\dot{m}$ ).

Para la facilitar la elección de los ventiladores se expresará este término en función del caudal volumétrico (V) en vez de como un flujo másico. Éste término se define como:

$$V = \dot{m}/\rho \quad (\text{E-III.112})$$

Siendo  $\rho$  la densidad del aire.

Para poder elegir un ventilador adecuado se definirán diferentes niveles de cobertura sobre la máxima alcanzable. Los niveles definidos son los siguientes:

Tabla IV.49 Porcentaje de cobertura sobre el máximo alcanzable

Porcentaje de cobertura sobre el máximo alcanzable
95 %
90 %
85 %
80 %
75 %
73 %
70 %
65 %
60 %
55 %
50 %
30 %
10 %
0 %

Se calculará el caudal que es necesario introducir a la doble piel a partir de los diferentes niveles definidos. Los resultados son los siguientes:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Tabla IV.50 Caudales y porcentaje de cobertura

Porcentaje de cobertura sobre el máximo alcanzable	V
95 %	35.461 m <sup>3</sup> /h
90 %	16.509 m <sup>3</sup> /h
85 %	10.575 m <sup>3</sup> /h
80 %	7.462 m <sup>3</sup> /h
75 %	5.567 m <sup>3</sup> /h
73 %	5.000 m <sup>3</sup> /h
70 %	4.335 m <sup>3</sup> /h
65 %	3.458 m <sup>3</sup> /h
60 %	2.788 m <sup>3</sup> /h
55 %	2.269 m <sup>3</sup> /h
50 %	1.854 m <sup>3</sup> /h
30 %	794 m <sup>3</sup> /h
10 %	207 m <sup>3</sup> /h
0 %	0 m <sup>3</sup> /h

Si se representan en una gráfica:

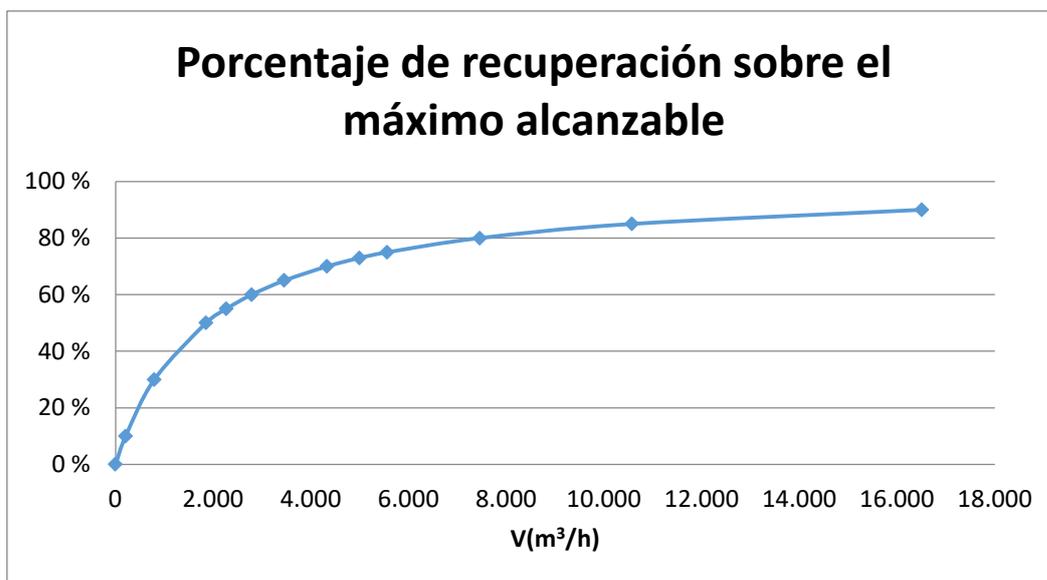


Figura IV.134 Porcentaje de recuperación sobre el máximo alcanzable

Se observa que según aumenta el caudal el rendimiento no aumenta en la misma medida, llegando a incrementos casi nulos para caudales grandes. Como solución de compromiso se ha tomado un caudal de 5000 m<sup>3</sup>/h para el cual se obtiene un rendimiento del 73% sobre el máximo.

Para el estudio de esta solución se plantea un caudal constante, que no varíe en función de las condiciones climatológicas. Esta opción se supone más

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

barata, al reducir los costes de equipos de control. En contrapartida, no se aprovechan al máximo las características del equipo ya que en algún momento puede ser deseable el uso de un menor caudal con un menor consumo o viceversa. Para poder evaluar la opción más viable económicamente se requeriría un estudio más detallado que se escapa al contenido de este TFG, por tanto se ha propuesto como una posible mejora en los futuros desarrollos.

A partir de las especificaciones anteriores se ha buscado un equipo comercial. Para ello se ha utilizado el selector de la marca S&P [W1]. El equipo propuesto es el modelo HXBR/6-560-A (230V50HZ)C V5 de la marca S&P [W2].



**Figura IV.135 Ventilador**

Las curvas del ventilador propuesto son:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

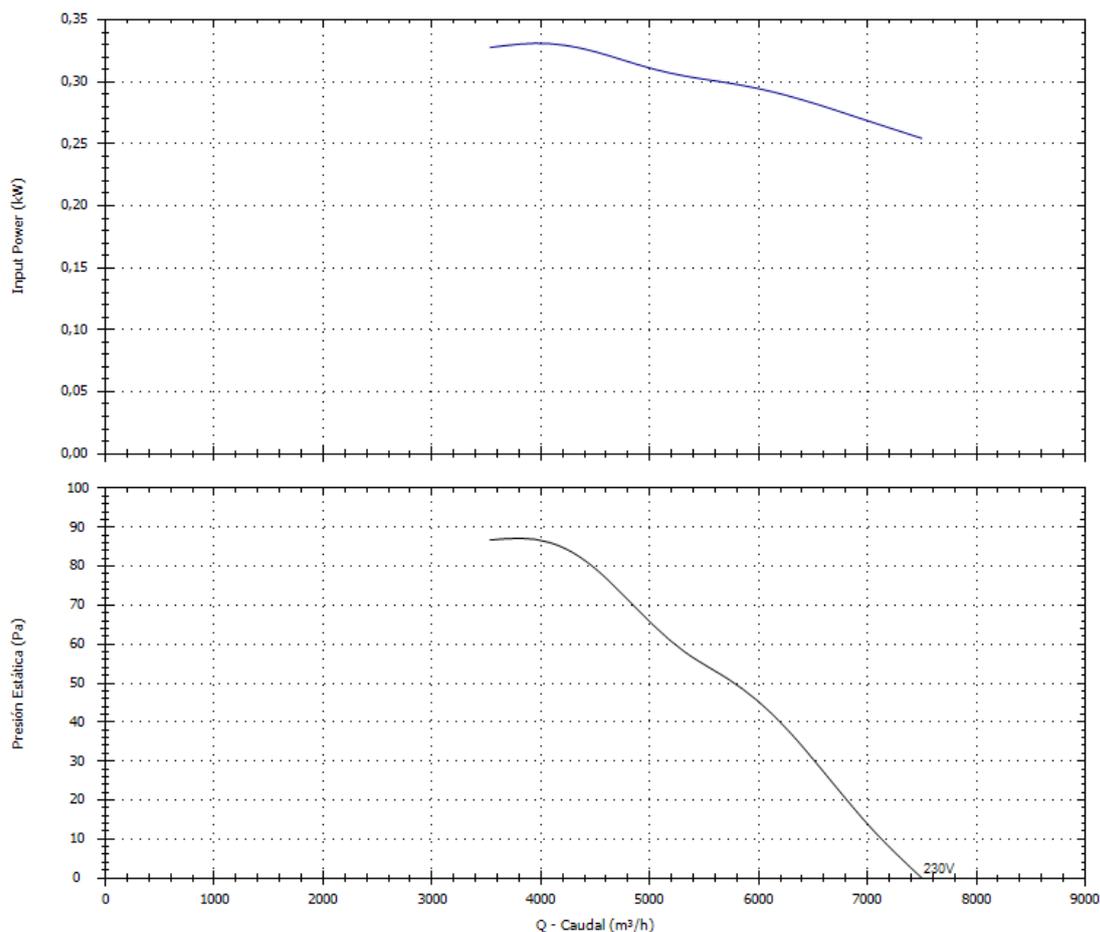


Figura IV.136 Curvas del ventilador

Sus características principales en el punto de trabajo se recogen en la siguiente tabla:

Tabla IV.51 Punto de trabajo

Característica	Valor
Caudal	5.000 m <sup>3</sup> /h
Presión estática	66 Pa
Presión dinámica	19,1 Pa
Presión total	85 Pa
Potencia Eléctrica absorbida	0,311 kW
Velocidad descarga	5,6 m/s
Velocidad ventilador	891 rpm
Potencia específica	0,22 W/l/s

[W3]

## 2.4. Evaluación de ahorros de calefacción

Una vez escogido el caudal de aire que se va a recircular a la doble cámara se procede a evaluar la mejora energética que se consigue.

Lo primero que se debe evaluar es si se cumplen en algún momento las condiciones que permiten la recirculación y la duración de las mismas. En caso de que apenas se pudieran aplicar las Medidas de Ahorro Energético (MAEs), no tendría sentido el seguir adelante con el estudio. Para ello se va a analizar el primer término de la ecuación de mejora del calor ganado, que es la que define si se reúnen las características climáticas necesarias para la circulación:

$$\left[ K_c + \left( \sum_2^6 C_i \right) \right] * Q_{Sol} + \left( \sum_2^8 B_i \right) * (T_{ext} - T_{int}) \quad (E-III.113)$$

Si este término es positivo se puede recircular, si es negativo no se reúnen las condiciones necesarias para aplicar las Medidas de Ahorro Energético (MAEs). Esto se puede estudiar de forma sencilla si se grafican los resultados:

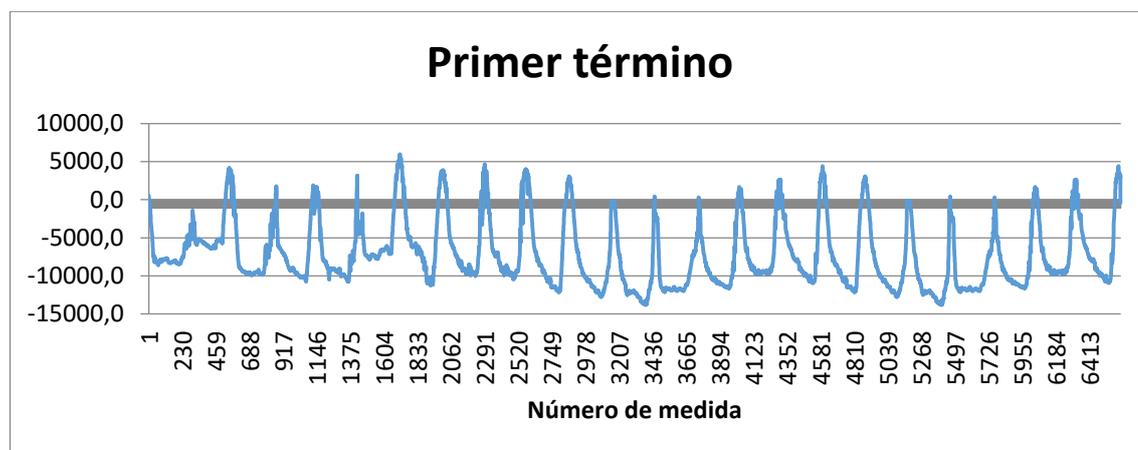


Figura IV.137 Primer término

Como se puede ver si que se llegan a obtener valores positivos, lo que implica que sí que hay opciones de recircular aire al interior del edificio.

El siguiente paso es conocer la cantidad de tiempo que se da esta circunstancia. Estos datos se recogen en la siguiente tabla:

Tabla IV.52 Tiempo de recirculación

Recirculación	%
SI	10%
NO	90%

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Se puede recircular aire aproximadamente un 10% del tiempo. Aunque a simple vista pueda parecer que el valor no es muy elevado, hay que tener en cuenta que solo se puede recircular de día y que además solo se puede hacer cuando las condiciones climatológicas son favorables: días no muy fríos con demanda de calefacción y con alta radiación.

Una vez visto que sí se reúnen las condiciones necesarias para poder recircular es momento de empezar a evaluar los ahorros térmicos. Para ello se graficará la mejora térmica producida la recircular aire en la cámara.

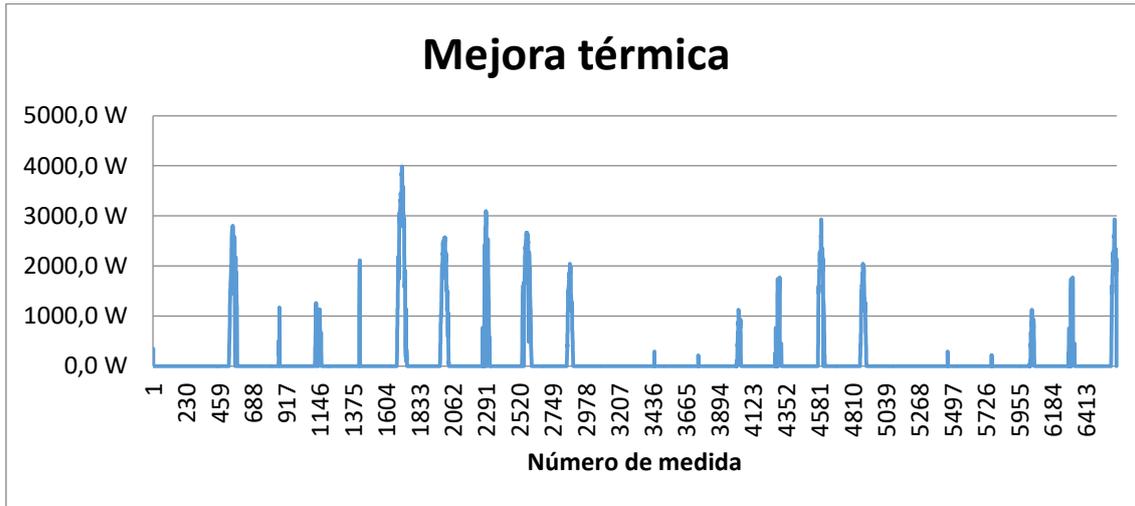


Figura IV.138 Mejora térmica

Esta mejora térmica se sitúa en valores máximos de hasta 4kW. La potencia térmica instalada en el Edificio Lucía asciende a 770 kW térmicos [W4]. En relación a la instalada en el Edificio Lucía, la potencia de la mejora por recirculación supone hasta un 0.52% sobre la instalada actualmente en el Edificio Lucía. Aún así, se tiene que tener en cuenta que este valor solo se alcanzará durante condiciones climáticas extremas de modo que este porcentaje puede ser mucho mayor en el periodo de medida. Lamentablemente, no es posible conocer este valor, ya que se desconocen las potencias de calefacción en el Edificio Lucía.

Una vez estudiada la mejora en potencia, queda por estudiar la mejora energética. No solo es importante conocer el valor máximo de la potencia entregada al edificio, sino que también hay que estudiar si el sistema trabaja en esas condiciones el tiempo suficiente. Si se evalúa en términos energéticos el ahorro total es de 72,8 kWh durante los 23 días del periodo estudiado.

Se puede apreciar como este valor es muy pequeño. Como posible comparación se sugiere la siguiente: si el Lucía trabajara a plena potencia durante una hora se

obtendrían 770 kWh, superando en 10 veces todo el ahorro conseguido durante los 23 días. El ahorro obtenido se puede considerar despreciable.

Aún así se proseguirá con el estudio, denotando que está pendiente el estudio de la mejora que puedan ofrecer los fotovoltaicos.

## 2.5. COP de la instalación

Si se hace una analogía con una bomba de calor se puede definir el COP de la medida propuesta como el cociente entre la potencia térmica entregada y la potencia consumida. El COP instantáneo se representa en la siguiente gráfica.

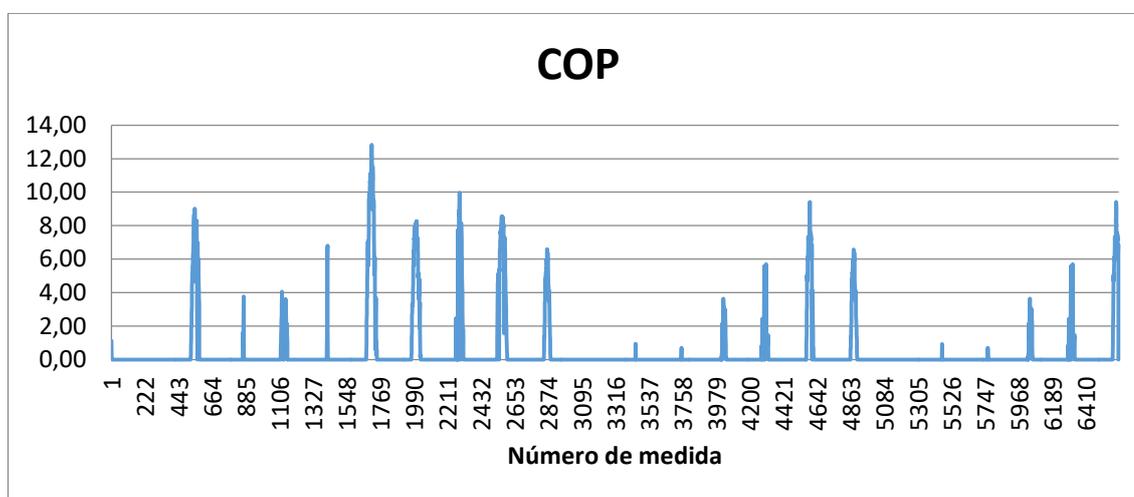


Figura IV.139 COP

Se puede observar que este alcanza valores de hasta 12,8. Esto implica que por cada vatio consumido de electricidad se obtienen más de 12 térmicos. Las bombas de calor instaladas en España poseen un COP promedio de 3,5 [1]. Si se comparan ambos valores se observa que el COP obtenido por el sistema sugerido es más de tres veces superior que el de una bomba de calor.

Si en vez de evaluar el COP instantáneo se evalúa el COP durante los 23 días del periodo de medida se obtiene un valor de 4,45. Este valor representa el COP promedio durante el periodo de medida, y aunque no es el que se tendría a lo largo de un año, ofrece una estimación de las condiciones en las que podría funcionar el sistema. En comparación con el COP nominal de una bomba de calor este valor sigue siendo ampliamente superior.

---

## 3. EVALUACIÓN DE MEJORA DEL RENDIMIENTO DEL FOTOVOLTAICO

---

Una vez analizados los ahorros térmicos producidos al introducir aire caliente desde la cámara al interior del edificio es el momento de evaluar la mejora del rendimiento del fotovoltaico con la temperatura.

### 3.1. Pérdida de rendimiento con la temperatura

---

Los valores nominales de producción eléctrica de los paneles fotovoltaicos se miden para una radiación de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C [W18]. En la realidad, los paneles se calientan al recibir radiación, de modo que aumentan su temperatura. El aumento de temperatura trae consigo una pérdida de rendimiento.

Los fabricantes suelen definir las pérdidas de rendimiento de los paneles con la temperatura. Por desgracia, la empresa fabricante de los paneles instalados en el Lucía quebró, sin posibilidad de tener acceso a esa información. Para poder evaluar este valor se ha recurrido a consultar este valor en placas de otros fabricantes y otras fuentes bibliográficas.

Para el estudio de la doble piel el rendimiento ( $\eta$ ) se definirá como:

$$\eta = \eta_{25^{\circ}\text{C}} - \Delta\eta \quad (\text{E-III.114})$$

Siendo  $\eta_{25^{\circ}\text{C}}$  el rendimiento nominal a 25°C, y  $\Delta\eta$  la pérdida de rendimiento por temperatura, que se define como:

$$\Delta\eta = P * (T_p - 25) \quad (\text{E-III.115})$$

Siendo P la pérdida unitaria de rendimiento por grado, y  $T_p$  a la temperatura del panel. Para obtener la pérdida unitaria de rendimiento por grado (P) se ha recurrido a diversas fuentes. Según las fuentes consultadas este valor se cifra en torno a 0.5 %/°C [2] [3] [W6] [W7], que será el valor que se tomará en el estudio.

Finalmente se obtiene que el rendimiento será:

$$\eta = \eta_{25^{\circ}\text{C}} - P * (T_p - 25) \quad (\text{E-III.116})$$

### 3.2. Mejora del rendimiento

Al principio del estudio de la doble piel se definió la temperatura de la pared, que es la que se tomará como la temperatura del panel:

$$T_{p,i} = \frac{Q_{Sol} * K_{Sol,i} * R_{int,i} * R_{ext,i} + T_c * R_{ext,i} + T_{ext} * R_{int,i}}{R_{ext,i} + R_{int,i}} \quad (E-III.117)$$

De esta manera se puede obtener la temperatura en la pared en función de la radiación incidente y de las temperaturas de la cámara y del exterior. Si se resta este valor del obtenido sin recircular se puede obtener la mejora de temperatura en los paneles fotovoltaicos:

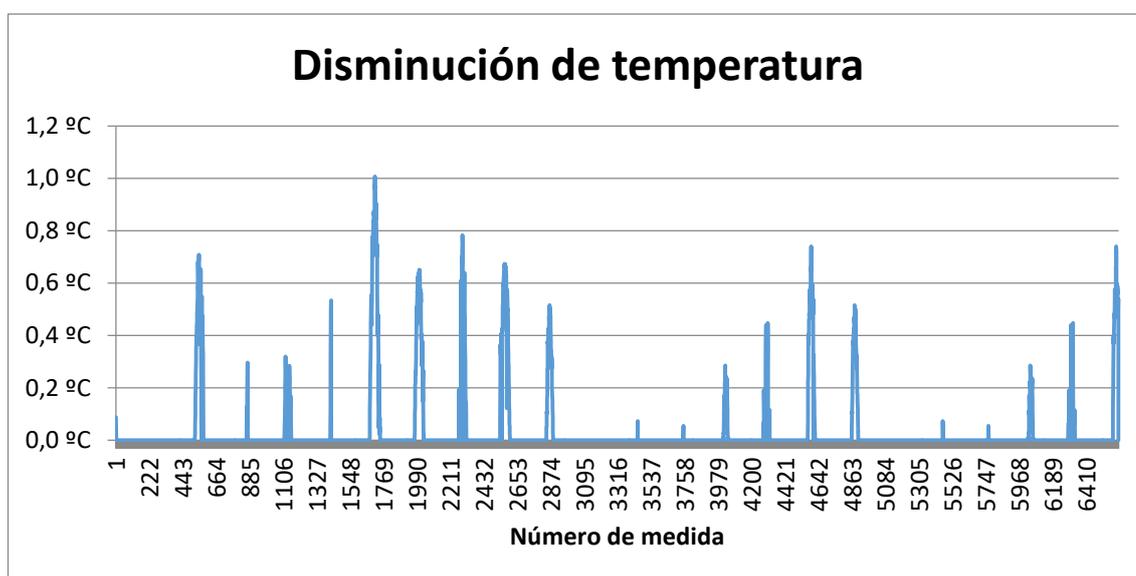


Figura IV.140 Disminución de temperatura

Los valores de reducción de temperatura no son muy grandes, están en torno a un máximo de un grado, pero esto supone una producción extra en el fotovoltaico que no debe ser desestimada (0,5%). Si se calcula el valor de reducción media de temperatura esta se encuentra en 0,3 °C. Con la reducción del rendimiento por grado establecida se obtiene una mejora media de un 0,17% en el rendimiento.

Tabla IV.53 Mejora en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos

Mejora	Valor
Reducción de temperatura máxima	1°C
Mejora rendimiento máxima	0,5%
Reducción de temperatura promedio	0,3°C
Mejora rendimiento promedio	0,17%

Si se habla en términos energéticos este valor aumentará ya que la mejora es mayor cuanto mayor sea la temperatura de los paneles, cosa que ocurre cuando la radiación es máxima, y por tanto su producción.

Se puede establecer la energía multiplicando la potencia instantánea por el tiempo entre medidas. De este modo se establece la energía producida por los fotovoltaicos cuando no hay recirculación y cuando si la hay. Estos datos se recogen en la siguiente tabla:

Tabla IV.54 Energía eléctrica producida

Funcionamiento	Energía
Sin recirculación	380,9 kWh
Con recirculación	382,5 kWh
Mejora	1,6 kWh

Durante los 23 días del periodo de estudio la mejora energética es de 1,6 kWh. A raíz de estos datos se concluye que la mejora energética es de 0,42% valor muy superior al de 0,17% de mejora del rendimiento medio.

Sin embargo, se puede apreciar que la mejora eléctrica en términos absolutos es muy pequeña. Como posible comparación se sugiere la siguiente: con un precio de 10 céntimos por kWh el ahorro se cifraría en 16 céntimos de euro. Este ahorro se puede considerar despreciable.

Por último, cabe mencionar que tal y como se indicó con anterioridad, el modelo utilizado es conservador con la temperatura, de modo que los ahorros producidos son menores. Si se tienen temperaturas más altas (como ocurre en la realidad), el margen de mejora es mayor ya que la temperatura en la doble piel disminuirá aun más, mejorando en mayor medida el rendimiento del fotovoltaico. Si bien esto supone una mejora añadida, cabe señalar que seguirá siendo despreciable en términos absolutos

### 3.3. Mejora en el COP de instalación

---

Como se comentó en el apartado anterior "*Evaluación de ahorros en calefacción*" se puede establecer una analogía con una bomba de calor que funcione en modo calefacción ya que ambos sistemas producen calor a partir de electricidad.

Si ahora se tiene en cuenta que se está produciendo una mayor cantidad de energía eléctrica en los fotovoltaicos, se puede restar esta producción extra a la del consumo del ventilador, siendo la solución aun más eficiente.

Si se representa el nuevo COP:

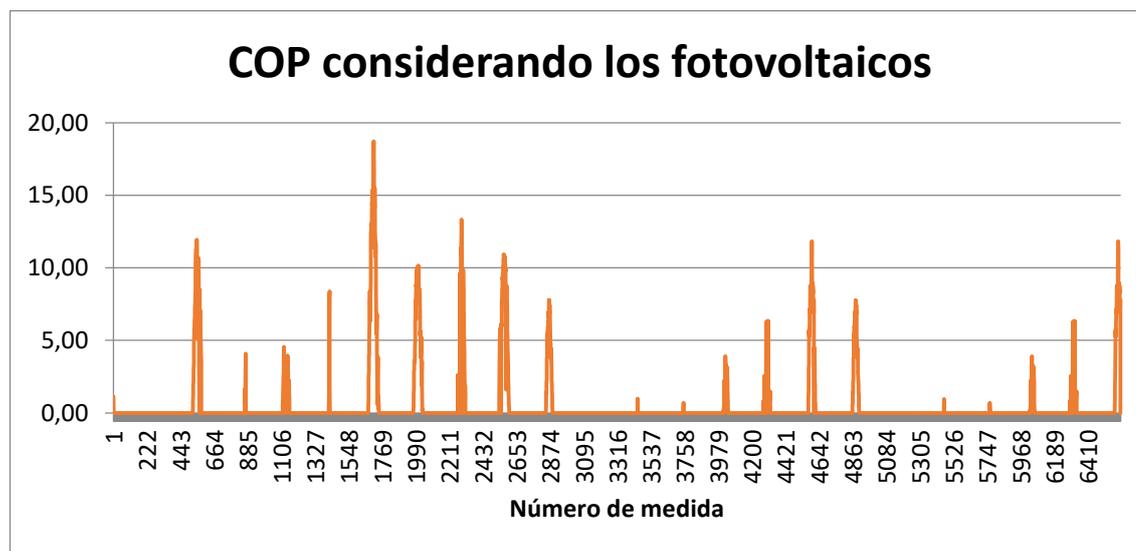


Figura IV.141 COP considerando los fotovoltaicos

Se puede observar que donde antes se obtenían valores de hasta 12,8 estos valores ahora se sitúan en 18.7 incrementando el COP máximo en un 50%. Esto implica que por cada vatio consumido de electricidad se obtienen más de 18 térmicos, siendo un valor muy superior al de una bomba de calor. Las bombas de calor instaladas en España poseen un COP promedio de 3,5 [4]. Si se comparan ambos valores se observa que el COP obtenido por el sistema sugerido es más de cinco veces superior que el de una bomba de calor.

Si en vez de evaluar el COP instantáneo se evalúa el COP en el periodo de medida se obtiene un valor de 5.23 frente a un valor previo de 4,45, incrementando el COP en el periodo de medida en un 20%. Aunque este valor representa el COP durante el periodo de medida, y no es el que se tendría a lo largo de un año, nos ofrece una estimación de las condiciones en las que podría funcionar el sistema que, como se puede apreciar, son ampliamente favorables. En comparación con el COP nominal de una bomba de calor este valor sigue siendo ampliamente superior.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

### Fuentes bibliográficas

---

- [1] “Síntesis del Estudio Parque de Bombas de Calor en España”. IDAE. 2014.
- [2] Martín, M. PFC. “Influencia de la temperatura en el generador fotovoltaico.” Universidad de Sevilla. Sevilla, 2004.
- [3] Collado, E. “Los efectos de la temperatura en la producción de las instalaciones fotovoltaicas”. Madrid 2015.
- [4] “Síntesis del Estudio Parque de Bombas de Calor en España”. IDAE. 2014.

### Referencias en páginas web

---

- [W1] S&P. Selección de ventilador. <http://easyvent.solerpalau.com/selector> Última consulta 04/10/2016.
- [W2] S&P. Punto de trabajo del ventilador. <http://easyvent.solerpalau.com/fan-info/11/5700387400> Última consulta 04/10/2016.
- [W3] S&P. Ventiladores elicoidales murales. <http://www.solerpalau.es/hxbr-6-560-a-230v50hz-c-v5.html> Última consulta 14/10/2016.
- [W4] Edificio Lucía. Energía primaria, biomasa. <http://edificio-lucia.blogspot.com.es/p/energia-primaria-biomasa.html> Última consulta 04/10/2016.
- [W5] Paneles fotovoltaicos. Qué es y cómo funciona un panel fotovoltaico. <http://paneles-fotovoltaicos.blogspot.com/> . Última consulta 18/03/2017.
- [W6] Soltecnica. Catálogos de fabricantes. <http://www.soltecnica.es/p/es/paneles-solares-fotovoltaicos/isofoton.php> Última consulta 21/03/2017.
- [W7] Varinia. Influencia de la temperatura en el rendimiento de los fotovoltaicos. <http://varinia.es/blog/2009/06/15/%C2%BFcomo-afecta-la-temperatura-al-rendimiento-de-las-celulas-fotovoltaicas/> Última consulta 21/03/2017.

---

## TABLAS

---

Tabla IV.1 Modos de funcionamiento .....	207
Tabla IV.2 Términos de la ecuación.....	223
Tabla IV.3 Porcentaje de cobertura sobre el máximo alcanzable .....	225
Tabla IV.4 Caudales y porcentaje de cobertura .....	226
Tabla IV.5 Punto de trabajo .....	228
Tabla IV.6 Tiempo de recirculación.....	229
Tabla IV.7 Mejora en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos.....	233
Tabla IV.8 Energía eléctrica producida .....	234

---

## FIGURAS

---

Figura IV.1 Con circulación .....	208
Figura IV.2 Sin circulación.....	209
Figura IV.3 Temperaturas durante un día de invierno .....	210
Figura IV.4 Temperaturas durante un día de verano .....	211
Figura IV.5 Utilizar aire del exterior del edificio .....	212
Figura IV.6 Utilizar aire del interior del edificio.....	213
Figura IV.7 Utilizar aire del interior y exterior del edificio .....	214
Figura IV.8 Utilizar aire del exterior del edificio .....	215
Figura IV.9 Utilizar aire del interior del edificio.....	216
Figura IV.10 Aprovechar el aire más frío del interior del edificio y la posibilidad de enfriamiento evaporativo del aire exterior .....	217
Figura IV.11 Temperaturas en el exterior .....	218
Figura IV.12 Temperaturas en el exterior .....	219
Figura IV.13 Temperaturas en el exterior .....	219
Figura IV.14 Modelo con recirculación.....	221
Figura IV.15 Porcentaje de recuperación sobre el máximo alcanzable .....	226
Figura IV.16 Ventilador.....	227
Figura IV.17 Curvas del ventilador .....	228
Figura IV.18 Primer término.....	229
Figura IV.19 Mejora térmica .....	230
Figura IV.20 COP.....	231
Figura IV.21 Disminución de temperatura.....	233
Figura IV.22 COP considerando los fotovoltaicos .....	235

---

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

---

### ÍNDICE CAPÍTULO V

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....	239
1. CONCLUSIONES.....	241
2. FUTUROS DESARROLLOS.....	243
2.1. MEJORA DEL ESTUDIO ACTUAL.....	243
2.2. OTRAS MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO (MAES).....	245
TABLAS.....	250
FIGURAS.....	251

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

## 1. CONCLUSIONES

Una vez acabado el estudio realizado sobre la doble piel es el momento de analizar los resultados obtenidos.

En primer lugar se debe confirmar la viabilidad del sistema, ya que a priori no se conocía si se iban a obtener ahorros o no. Hay que destacar que los ahorros obtenidos son tanto térmicos como eléctricos. En términos de potencia, la ganancia es de hasta 4kW térmicos y en términos eléctricos es de hasta 100W en el periodo estudiado.

Si se habla en términos energéticos la ganancia es de 72,8 kWh térmicos y de 1,6 kWh eléctricos durante el periodo estudiado. Como se ha comentado durante el estudio, estos valores son prácticamente insignificantes, ya que los valores de potencias máximas se alcanzan durante poco tiempo, haciendo inviable cualquier inversión.

Tanto los valores de potencia como de energía se recogen en la tabla inferior:

Tabla V.55 Ganancias térmica y eléctrica

Ganancia	Potencia	Energía
Térmica	4kW	72,8 kWh
Eléctrica	100W	1,6 kWh

En segundo lugar, hay que evaluar el rendimiento del equipo en comparación con otros existentes en la actualidad, como pudieran ser las bombas de calor. La mejora propuesta presenta unas características ampliamente mejores como son un COP durante el periodo de medida de 4,5 llegando hasta valores instantáneos de 12,8. Si se tiene en cuenta la mejora de producción en los paneles fotovoltaicos como una reducción del consumo los valores aumentan hasta 5,2 para el periodo de medida y hasta 18,7 el instantáneo, suponiendo una importante mejora respecto a una bomba de calor. Éstos valores se recogen en la tabla inferior:

Tabla V.56 COP con y sin recirculación

COP	Sin recirculación	Con recirculación
COP promedio	4,5	5,2
COP máximo	12,8	18,7

## Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

Cabe decir que el estudio se ha realizado de forma conservadora, esto implica que en caso de implementar la Medida de Ahorro Energética propuesta los ahorros serían mayores.

Se considera que la medida propuesta supone una mejora del comportamiento actual de la doble piel, y que de ser implantada supondría una mejora en la eficiencia del edificio. Sin embargo, ya que los ahorros energéticos son muy pequeños, se descarta cualquier inversión, solo siendo esta opción viable si se combina con alguna otra Medida de Ahorro Energético (MAE) que sí sea viable por sí sola, proponiendo la medida actual como un complemento adicional.

Por último, hay que recalcar que el estudio realizado deja abiertas nuevas vertientes de Medidas de Ahorro Energético (MAEs) en la doble piel. Dentro de éstas no solo se incluye el estudio más detallado de la mejora propuesta, realizando un análisis más exhaustivo y de resultados más exactos, si no también el estudio de las otras Medidas de Ahorro Energético (MAEs) que se han ido proponiendo y que no han sido objeto de estudio. Todas ellas se recogen en el apartado siguiente denominado "*futuros desarrollos*".

---

## 2. FUTUROS DESARROLLOS

---

Una vez concluido el estudio de la doble piel solo queda proponer las nuevas líneas de investigación que surgen a raíz de este TFG. Estas líneas surgen en dos sentidos principalmente: la mejora del estudio actual y el estudio de otras Medidas de Ahorro Energético (MAEs).

### 2.1. Mejora del estudio actual

---

El estudio con el que se han evaluado los ahorros de calefacción en periodo de invierno es susceptible de mejora. La mejora del estudio actual se puede realizar de diferentes maneras: abarcando más aspectos, haciendo el modelo más preciso o teniendo en cuenta más variables de optimización. A continuación se desarrollarán brevemente cada una de las anteriores.

#### Nuevos aspectos a abarcar

---

El estudio se focaliza en calcular ahorros energéticos, tanto térmicos, como eléctricos. En este sentido hay aspectos que se dejan de lado como el impacto económico o medioambiental que también pueden ser efecto de estudio.

Además, tampoco se realiza un estudio de viabilidad técnica. Dentro de la viabilidad técnica se podría hablar de: espacio a la hora de montar ventiladores, tuberías o los sensores necesarios, la posibilidad de conexión a la red de tuberías actual, etc.

Otro aspecto a destacar es el estudio de la legislación actual, la necesidad legal del control de la ventilación, obligatoriedad de filtros, etc.

Por último, en el espacio temporal, se debería hacer un estudio que abarcara al menos un año para conocer la evolución a lo largo de un periodo de tiempo más representativo.

#### Mejora del modelo

---

Por otro lado, durante el texto se citan en repetidas ocasiones el uso de hipótesis o estimaciones que si bien resultan en un modelo conservador, hacen que éste pierda precisión no reflejando de forma exacta la realidad. En

este sentido cabe destacar que una mayor precisión ofrecería mayores ahorros.

Una de las hipótesis que se realizan en el estudio es la de la eliminación de la estratificación térmica. Esta hipótesis es ampliamente beneficiosa desde el punto de vista del cálculo ya que homogeniza tanto los flujos de calor en todas las superficies como la producción fotovoltaica al estar todos los paneles a la misma temperatura. Además, esta hipótesis es influyente a la hora de calcular las temperaturas de circulación del aire en la cámara ya que con estratificación térmica se obtendría mayor salto térmico, obteniendo así mayor energía.

Para superar este problema se podría hacer un estudio a la doble piel mediante un programa de volúmenes finitos, en el cual se tuviera en cuenta la temperatura a lo largo de toda la doble piel, pudiendo evaluar cada flujo de calor y cada fotovoltaico con una temperatura.

Además, para poder precisar aun más la producción fotovoltaica, se podría utilizar no solo la temperatura exacta de cada modulo, si no mediante un software específico, ajustar la radiación recibida por los paneles debido a su orientación y el ángulo que forman con el Sol.

También podrían mejorarse las resistencias a los flujos de calor que se han estudiado de forma teórica validándolas mediante un estudio experimental o mediante un modelo regresión incluyendo un análisis estadístico.

Por último, en el estudio se supone la doble piel como hermética, cosa que en la realidad no ocurrirá ya que dependiendo de la presión en la misma existirán infiltraciones o exfiltraciones, que se tendrán que tener en cuenta como pérdida o ganancia energética.

### **Otras variables de optimización**

---

El modelo también debería incorporar otras variables que ahora no se tienen en cuenta, por ejemplo: velocidad del viento, humedad, etc.

Además, habría que poder tener en cuenta diferentes estrategias de control. Este es el caso de una regulación que no fuera todo o nada de los ventiladores (como lo es en el modelo actual), con sus correspondientes potencias de funcionamiento a diferentes caudales. Otro ejemplo sería un comportamiento que regulara acumulando aire caliente y que luego lo introdujera para reducir los costes de ventilación.

## 2.2. Otras Medidas de Ahorro Energético (MAEs)

---

Como se ha comentado en el desarrollo del trabajo, existen varias opciones para mejorar el comportamiento de la doble piel. En el presente trabajo solo se ha estudiado el comportamiento de la recirculación de aire del edificio durante los meses de invierno pero existen otras posibilidades, tanto en invierno como en verano, que no se han estudiado.

Entre estas propuestas se encuentran el uso de aire exterior para refrigeración en verano mediante enfriamiento evaporativo:

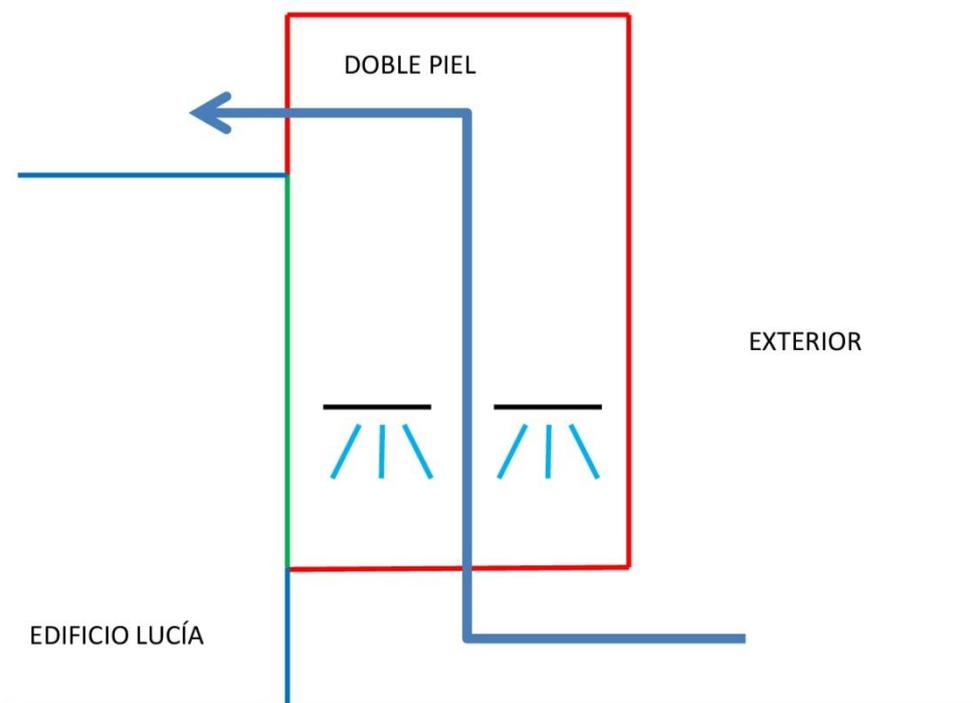


Figura IV.142 Con aire exterior

El uso de aire interior para refrigeración en verano mediante enfriamiento evaporativo

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

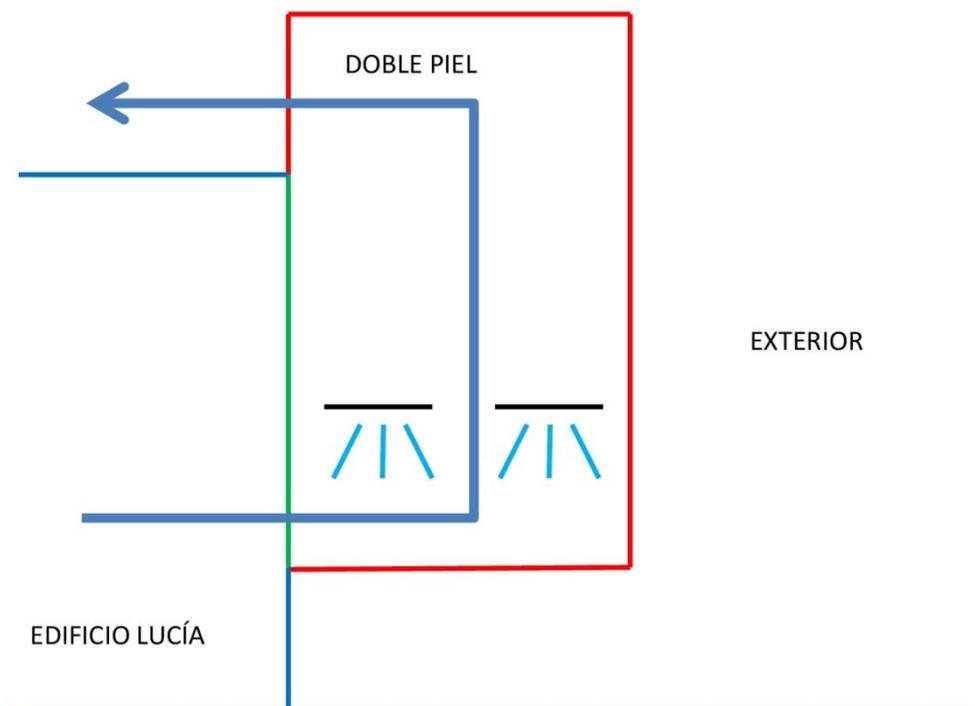


Figura IV.143 Con aire interior

La combinación de las dos anteriores:

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

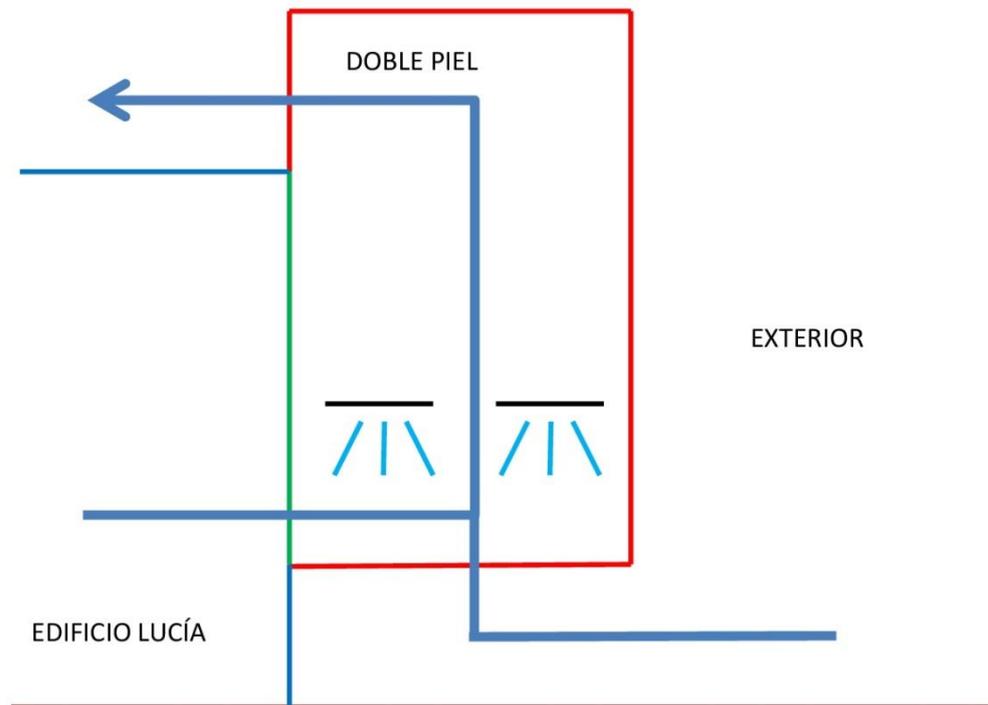


Figura IV.144 Con aire interior y exterior

El uso del aire del exterior durante los meses de invierno para reducir calefacción y ventilación.

Análisis de Medidas de Ahorro Energético (MAES), aplicables a un edificio universitario de bajo consumo energético.

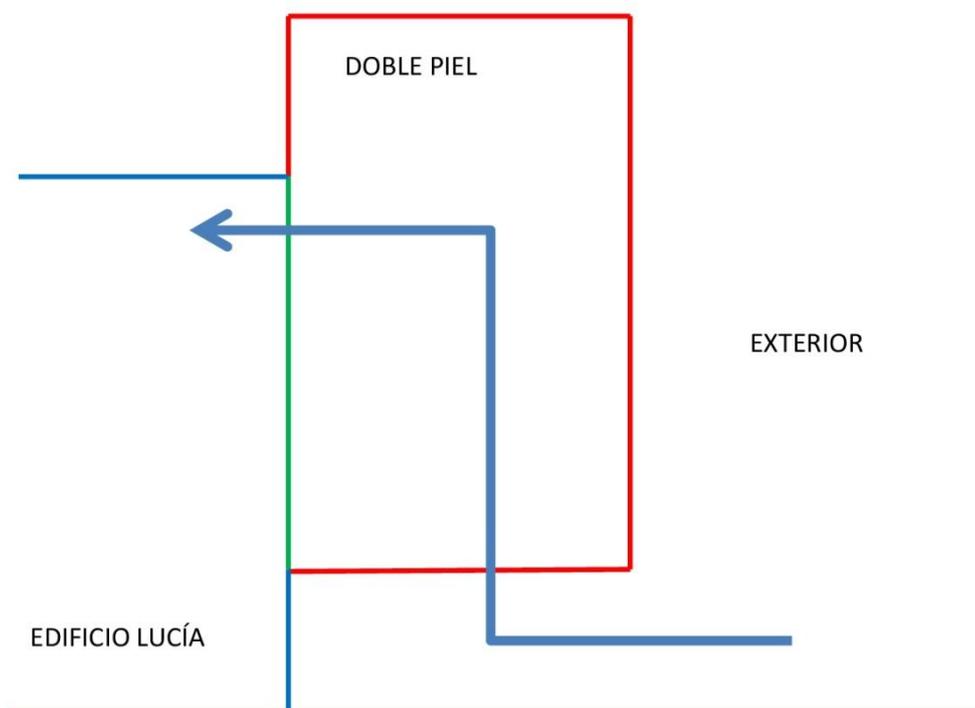


Figura IV.145 Con aire exterior

La combinación del uso del aire exterior e interior durante los meses de invierno para reducir calefacción y ventilación



---

## TABLAS

---

Tabla V.1 Ganancias térmica y eléctrica.....	241
Tabla V.2 COP con y sin recirculación .....	241

---

## FIGURAS

---

Figura IV.1 Con aire exterior .....	245
Figura IV.2 Con aire interior.....	246
Figura IV.3 Con aire interior y exterior .....	247
Figura IV.4 Con aire exterior .....	248
Figura IV.5 Con aire interior y exterior .....	249