

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

TRABAJO FIN DE GRADO

CURSO ACADÉMICO 2014-2015

REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE BARRIADAS OBSOLETAS EN ANDALUCÍA.

| **E**studio de soluciones constructivas en módulos de ensayo.

JULIA GUERRERO RUBIO

TUTOR: JAIME NAVARRO CASAS

Tribunal: TFG-1: Construcciones Arq.- Ingeniería del Terreno – Estructuras de la Edificación.

Sevilla, Julio 2015

Agradecimientos

Al proyecto del Plan Estatal I+D I REFAVIV “Rehabilitación energética de las fachadas de viviendas sociales deterioradas aplicando productos innovadores nacionales (DIT) y europeos (DITE)” (ref. BIA2012-39020-C02-01) y a la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), por la aportación de datos para la realización del trabajo fin de grado.

Al grupo de investigación TEP-130 del PAIDI por haberme facilitado el acceso a la información de estos datos para la realización del trabajo fin de grado.

A Jaime Navarro Casas, Juan José Sendra Salas y Jessica Fernández-Agüera Escudero, del grupo TEP-130, por la revisión del trabajo y las mejoras realizadas con sus aportaciones y sugerencias.

ÍNDICE

1. Introducción.

1.1. Motivación. Relevancia y oportunidad.

1.2. Definición del alcance del proyecto y del marco en el que se inserta.

1.2.1. Objetivos generales.

1.2.2. Objetivos específicos.

1.3. Contexto social y normativo.

2. Estado del arte.

3. Metodología.

5. Análisis de resultados

6. Conclusiones.

7. Ideas para ampliar el trabajo.

8. Bibliografía.

1. Introducción

1.1 Motivación. Relevancia y oportunidad

El incremento de la población mundial sumado al gran desarrollo tecnológico, cada vez más acelerado, provocan un aumento en el número de instalaciones aplicables a la edificación en busca del confort térmico y de condiciones habitables acordes con los perfiles de vida de la población actual. Esto causa un aumento de la demanda energética y, por consiguiente, de la emisión de CO₂, cuya generación depende actualmente en su mayor porcentaje de los combustibles fósiles. Sin embargo, el consumo desmesurado en las últimas décadas ha dado lugar a la búsqueda de fuentes de energía alternativas a combustibles como el petróleo, el gas, el carbón, etc., cuyo volumen es finito, a partir de energías renovables. Además, deben desarrollarse otras medidas de tipo pasivo, como el estudio de soluciones óptimas de cerramientos que induzcan a la disminución de la demanda energética.

El ahorro de energía y la disminución de la emisión de CO₂ son una prioridad en el sector de la edificación, tanto para construcciones de nueva planta como para la rehabilitación energética. De hecho, es una de las prioridades del Horizonte 2020 de la Comisión Europea y su política investigadora y la de los estados miembros de la Unión Europea lo recogen claramente en los denominados Retos del Conocimiento.

De acuerdo a esas prioridades políticas, los edificios de nueva planta deben adoptar todas las medidas necesarias para que el consumo de energía sea prácticamente nulo. Sin embargo, no nos debemos limitar solo a ellos. Hay que fomentar la rehabilitación energética, mejorando lo máximo posible todo aquello que ya haya sobrepasado su vida útil. Especialmente relevantes son las políticas de rehabilitación del parque de viviendas construido en las décadas de los cuarenta, cincuenta, sesenta y setenta, especialmente estas dos últimas, porque que fue construido antes de la primera normativa térmica que obligaba a incorporar aislamiento térmico en la envolvente del edificio. Esta normativa, la NBE-CT-79, fue de aplicación en 1980, por lo que todos los edificios construidos con anterioridad tienen un construcción muy deficiente en cuanto a aspectos energéticos.

La rehabilitación energética de una vivienda tiene como objetivos: por una parte, mejorar la eficiencia energética y, por lo tanto, el ahorro en el uso de la energía; y por otra, reducir las emisiones de CO₂ para luchar contra el cambio climático y cumplir así con el Protocolo de Kioto.

Según datos recogidos en el Proyecto RehEnergía ¹, la rehabilitación energética podría conseguir:

- Entre un 12 y un 40% de ahorro energético, gracias a actuaciones de reducción de la demanda a través de la mejora en fachadas, cubiertas y huecos.
- Entre un 20 y un 40% de ahorro energético, a través de la mejora en instalaciones térmicas (aplicación de energía solar térmica e incorporación de gas).
- Por otra parte, la mejora eficiente de la iluminación podría proporcionar una eficiencia adicional de entre un 3 y un 8%.

En nuestro país, la rehabilitación energética ofrece un amplio potencial de desarrollo ya que, gran parte de los edificios que habitamos hoy, fueron construidos con una exigencia de limitación de demanda energética muy baja, y en algún caso, inexistente. Sin embargo, y comparándonos con Europa, existe también en esto una importante distancia, ya que, en Europa (en 2009) la rehabilitación representó el 43 % de media, mientras que en España solo el 19%, según datos obtenidos del Proyecto RehEnergía mencionado anteriormente. En la demanda energética de un edificio es fundamental la envolvente, y por tanto, su mejora nos conduce a una reducción de la misma.

¹ Proyecto RehEnergía. Plataforma social para el fomento de la rehabilitación, la accesibilidad y la eficiencia energética de los edificios.

Para poder llevar a cabo un estudio sobre la influencia energética de las envolventes no resulta suficiente la simulación, es necesario la experimentación, que procure una base científica sobre la que apoyar la aplicabilidad de cada solución de cara a la rehabilitación energética. De esta manera, haciendo uso los módulos instalados en el Campus de Montegancedo por la Universidad Politécnica de Madrid podemos llegar a obtener unas conclusiones que supongan una aportación de este trabajo fin de grado.

1.2 Definición del alcance del proyecto y del marco en el que se inserta

La envolvente térmica de un edificio está compuesta por todos los cerramientos que limitan espacios habitables con el ambiente exterior (aire, terreno u otro edificio), y por todas las particiones interiores que limitan los espacios habitables con los espacios no habitables que, a su vez, estén en contacto con el ambiente exterior.

El objeto principal de la rehabilitación energética es la modificación de las envolventes, desarrollando cerramientos (incluyendo sus huecos) y cubiertas acordes a las necesidades de confort, aprovechando el desarrollo de nuevas tecnologías para disminuir la demanda de instalaciones calefacción y refrigeración. De esta manera se pretende conseguir una reducción del consumo energético en las viviendas, sobre todo de climatización. Esta cuestión está adquiriendo una relevancia a nivel mundial debido al gran incremento del consumo energético, y los problemas medioambientales que esto genera.

Este trabajo fin de grado se inserta en un proyecto de investigación sobre rehabilitación energética de edificios, en concreto en el proyecto denominado REFAVIV “Rehabilitación energética de las fachadas de viviendas sociales deterioradas aplicando productos innovadores nacionales (DIT) y europeos (DITE)”, perteneciente al Plan Nacional I+D+i (BIA2012-39020-C02-01), cuyo periodo de ejecución es de 01/01/2013 a 31/12/15, por tanto, actualmente en curso. Lo desarrollan tres grupos de investigación: uno del Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (CSIC), otro de la Universidad Politécnica de Madrid y un tercero del Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, formado por investigadores del TEP-130 coordinados por el director del IUACC.

Formando parte de las tareas del citado proyecto, desde finales de mayo de 2014 se están monitorizando tres celdas de ensayo ubicadas en el campus de Montegancedo de la UPM (Fig.1). Son celdas cuyas envolventes, a excepción de una de las fachadas, son adiabáticas, es decir, poseen una gran resistencia térmica derivada del espesor del aislamiento con que han sido construidas, lo que reduce al mínimo la transferencia de calor a través de ellas. La única pared que no es adiabática de cada celda es la que se ejecuta con la solución de fachada con la que se quiere ensayar.

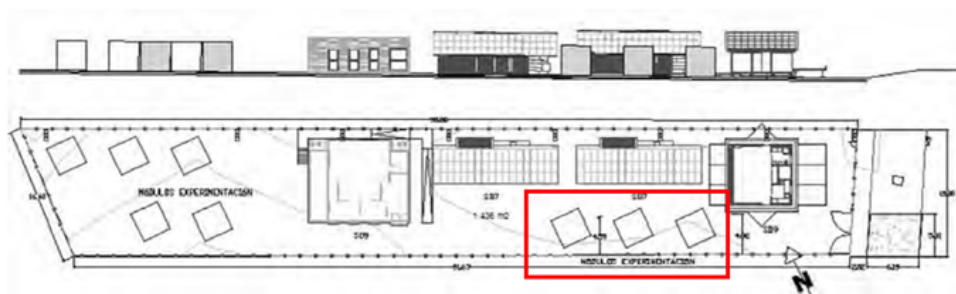


Fig. 1. Localización de los módulos en el Campus de Montegancedo. Enmarcados en rojo se indican los tres módulos utilizados. Fuente: Proyecto REFAVIV.

Desde hace varias décadas, la investigación sobre la mejora del comportamiento energético en edificios asociada a los elementos constructivos, dada la dificultad de realizarla en edificios reales, se ha llevado a cabo a partir de métodos empíricos, generalmente a partir de celdas de ensayo con condiciones de contorno reales y acordes a aquello que se está investigando. Los programas de simulación energética deben constituirse en un complemento de los anteriores y no en la única herramienta de análisis. Como el proyecto de investigación es sobre rehabilitación energética de viviendas construidas entre 1940 y 1980, es decir, con anterioridad a la existencia de la primera normativa general que limitaba la demanda energética, la NBE-CT-79, se adoptó que en un módulo, el denominado módulo base (M1), la solución de fachada fuese la más común de ese periodo: la fachada de doble hoja de ladrillo con cámara de aire intermedia (citara+cámara+tabique). Para los otros dos módulos, después del correspondiente análisis energético, se eligieron las dos soluciones de rehabilitación de la fachada tradicional potencialmente más favorables: para el módulo 2 (M2) se adoptó la fachada ventilada sobre la base (FV) y para el módulo 3 (M3) se adoptó la solución de Sistema de Aislamiento por el Exterior (SATE), también aplicada sobre la solución tradicional (Fig.2). En ambos casos se seleccionaron soluciones comercializadas con DIT y DITE.

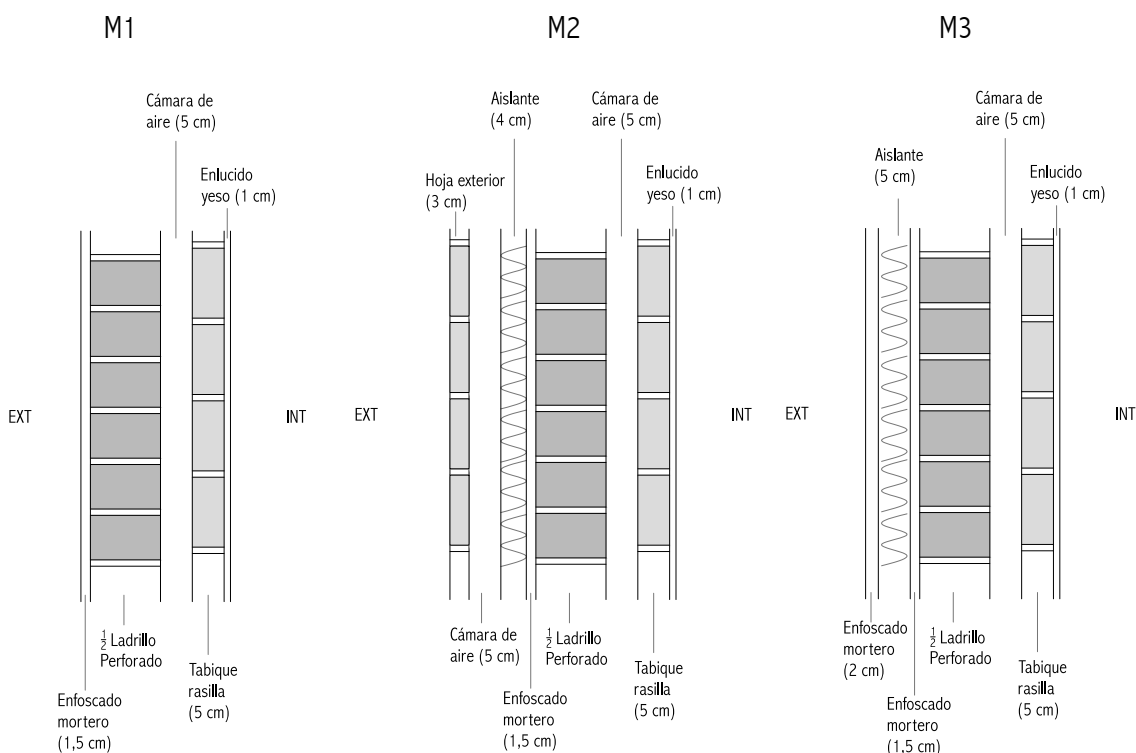


Fig. 2. Solución constructiva para los módulos M1, M2 y M3. Fuente: Elaboración propia.

Estas fachadas de los tres módulos se orientaron al sur y, además, el color de su acabado exterior es el mismo para poner en las mismas condiciones la componente de la radiación solar incidente (Fig.3). Las tres fachadas ensayadas no disponen de huecos, ya que el objeto de estudio del proyecto de investigación es la parte ciega de los cerramientos de fachada. Los módulos son



Fig. 3. Módulos finalizados en el Campus de Montegancedo. Fuente: Proyecto REFAVIV.

prácticamente estancos, no disponiendo de sistemas de ventilación. Sí están equipados con equipos partidos de expansión directa, del tipo bomba de calor aire-aire, con una unidad interior (split) de tipo mural en cada módulo. Estos equipos permiten mantener las temperaturas interiores estables de acuerdo a los valores establecidos de consigna. Circunstancialmente estos equipos se desactivan con el fin de poder comprobar cómo es el comportamiento de los módulos en libre evolución. Los datos obtenidos de la monitorización de estos módulos se están utilizando fundamentalmente para la calibración de las simulaciones energéticas realizadas con software específico por el equipo del IUACC de la Universidad de Sevilla para el desarrollo del proyecto de investigación. Pero, después de un año de monitorización, se dispone de un volumen de datos elevado que se puede utilizar para otros fines de investigación.

El grupo de investigación TEP-130 ha proporcionado a la autora de este Trabajo Fin de Grado los datos de la monitorización del periodo de verano e invierno de estos tres módulos, con el fin de desarrollar un trabajo individual de iniciación a la investigación de análisis de esos datos que permita sacar conclusiones, tanto en valores absolutos como relativos, sobre la relación entre temperaturas exteriores y consumos derivados de la climatización para mantener unas condiciones de confort en los tres módulos: el módulo base (M1), como representativo de un cerramiento de fachada previamente a su rehabilitación, y los dos módulos M2 (FV) y M3 (SATE), como representativos de cerramientos de fachada tras su rehabilitación. Esos consumos de climatización naturalmente estarán relacionados con las soluciones de fachadas, por lo que con este trabajo fin de grado podremos hacer una valoración sobre la mejora de la eficiencia energética de ambas soluciones sobre la solución base, así como una estimación de cuál de las dos soluciones de rehabilitación, la fachada ventilada o el SATE, es más eficiente en el periodo de verano y en invierno, y en qué medida.

Obviamente las limitaciones de esas conclusiones responden a las condiciones con se efectúan los ensayos: los módulos están en Madrid, por lo que en sentido estricto solo se aplicarían a localizaciones de similar latitud y zona climática, si bien pueden ser extrapolados sin grandes diferencias, a zonas climáticas similares en Andalucía; no hay huecos en la fachada, por tanto, hemos de entender que solo se refieren a la parte ciega de las fachadas; todas las fachadas están orientadas al sur y libre de sombras, para otras orientaciones habría que complementar el estudio; no hay sistemas de ventilación, por lo que no hay disipación de energía, por ejemplo, por ventilación nocturna en verano, amplificándose los efectos de la acumulación de calor en los módulos.

1.2.1. Objetivos generales

Estudiar la eficiencia energética de soluciones de fachadas, fundamentalmente orientadas a la rehabilitación de barriadas obsoletas ubicadas en Andalucía. Se obtendrán conclusiones a partir del análisis de datos reales de monitorización de módulos de ensayos, en los periodos de verano e invierno, ubicados en el campus de Montegancedo de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Comunidad de Madrid.

1.2.2. Objetivos específicos

- Establecer relaciones entre la temperatura media exterior y el consumo energético necesario para mantener condiciones de confort en los módulos de ensayos, en los periodos de verano e invierno, para cada una de las soluciones de fachada: fachada tradicional (base), fachada tradicional rehabilitada con Fachada Ventilada (FV) y fachada tradicional rehabilitada con Sistema de Aislamiento por el Exterior (SATE).
- Efectuar valoraciones sobre la mejora de la eficiencia energética de la soluciones de rehabilitación respecto de la solución base (previa a la rehabilitación), así como de una solución de rehabilitación (FV) respecto de la otra (SATE), tanto en periodo de verano como de invierno.
- Establecer un modelo predictivo que, para localizaciones de módulos de similar latitud y zonas climáticas, a partir de los valores de su archivo climático, concretamente, de los valores de temperatura medias exteriores en los periodos de verano e invierno, permita obtener las ecuaciones de los consumos de climatización y, a partir de ellos, hacer valoraciones sobre la eficiencia energética de las soluciones de rehabilitación de fachadas.

1.3. Contexto social y normativo

La emisión de gases de efecto invernadero está profundamente ligada a nuestro modelo de sociedad, y por ello no existe una conciencia clave para la reducción de la misma. Aunque esto se reguló en el Protocolo de Kioto (1997), los objetivos no se han cumplido. El principal emisor de gases de efecto invernadero en 2009 era Estados Unidos, con el 24,3% de las emisiones globales. El siguiente es la Unión Europea con el 15,3%, seguido de China (14,5%), Rusia (5,9%), India (5,1%) y Japón (5%). España se coloca en el puesto número veinte, con el 1,3 % de las emisiones globales. A nivel nacional, las emisiones muestran una tendencia de crecimiento significativo desde la década de los noventa, con descensos puntuales, hasta que comenzó a descender aproximadamente a partir del año 2006, acercándose en 2012 a los niveles acordados en el Protocolo de Kioto (Fig.4).

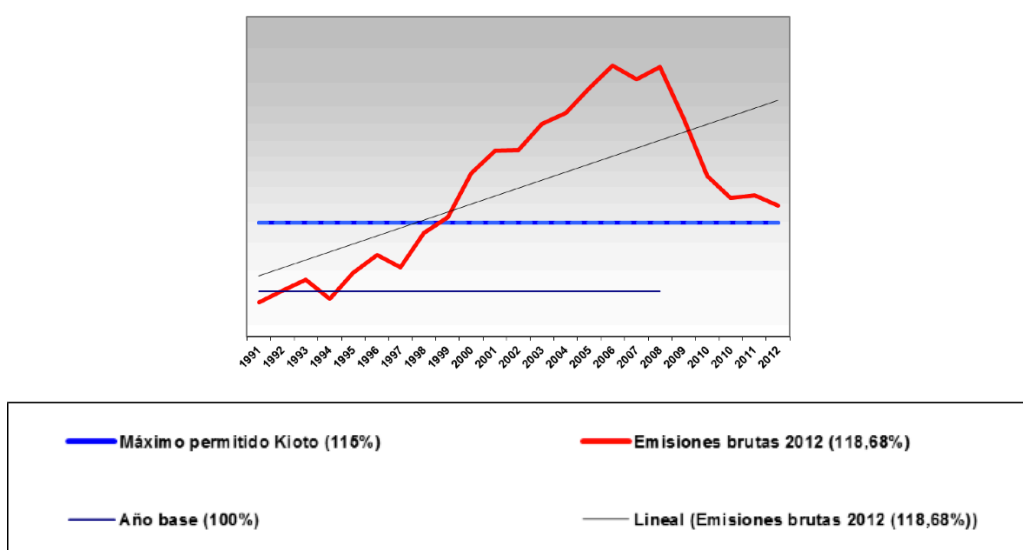


Fig. 4. Gráfica de la evolución de las emisiones de GEI en España(1990-2012). Fuente: Informe de emisiones de Gases de Efecto invernadero en España 1990-2012 WWF España 2013.

Las emisiones de gases de efecto invernadero, mayoritariamente de CO₂, están relacionadas directamente con el consumo energético a nivel nacional. En la figura 5 se refleja el consumo por sectores. Podemos observar cómo el sector residencial consume un 16 % del total de la energía, aunque no es el sector con el índice más alto de consumo, ya que el transporte se lleva el 43%, y la industria el 27%.

Mike Barker² explica, “El sector de la construcción consume el 40% aproximadamente del consumo final de energía de España, y la demanda energética en edificios crece a más del 4% al año, y está previsto que la demanda energética suba aproximadamente un 30% en los próximos 10 años”.

Los hogares españoles (Fig.6) consumen el 16% de toda la energía final y el 25% de la electricidad, seguida del gas natural. El consumo en su mayoría es absorbido por la calefacción (47%) y por los electrodomésticos (21,7%), seguido por el ACS con un 18,9% de toda la energía total consumida.



Fig.5. Reparto de la energía final en España 2013.

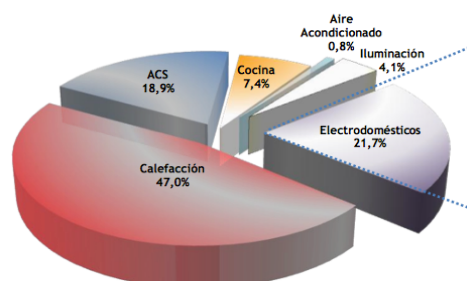


Fig.6. Consumo energético residencial España 2013.

Fuente: Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. I.D.A.E.

Este incremento del consumo energético se ha tratado en numerosas cumbres y protocolos de ámbito mundial, como son:

- El **Protocolo de Montreal**, firmado el 16 de septiembre de 1987, considera el desarrollo sostenible como una prioridad de la comunidad internacional. En materia energética plantea los objetivos de mayor eficiencia energética, el desarrollo de las energías renovables, disminuir los impactos sobre la salud y el medio ambiente de la producción y consumo de energía, y el fomento de una educación hacia el desarrollo sostenible.
- El **Programa 21 de la ONU**, firmado en 1992, tiene por objetivo el control de aquellas sustancias que producen el agotamiento de la capa de ozono, incluso llegando a la prohibición del uso de algunas de ellas como son los CFC (clorofluorocarburos).
- La **Cumbre de Río de Janeiro** o “Cumbre de la Tierra”, en junio de 1992, en donde se definen los deberes y derechos de los Estados respecto de principios básicos sobre el medio ambiente y el desarrollo.
- El **Protocolo de Kioto**, aprobado en el año 1997 durante la tercera Conferencia de las Partes del Convenio, entró en vigor el 16 de febrero de 2005. Fue firmado entre otros por la UE

² Barker, Mike. (2005). El ahorro energético, CO₂ y el desarrollo sostenible. Hacia una arquitectura sostenible. ICARO CTAV Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia. España.

y ratificado por España, y su objetivo es la disminución de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, en especial del CO₂. La Unión Europea en su conjunto, se comprometió a reducir sus emisiones en un 8% para el año 2010 respecto a los niveles de 1990. Para España, dada su situación de desarrollo, se permitió un incremento del 17% para el mismo período de tiempo.

- La **Cumbre de Johannesburgo**, celebrada en 2002, en la que se pretendía ofrecer un discurso ecologista como parte de la labor de concienciación sobre la importancia del desarrollo sostenible, por lo que se definieron las medidas concretas y metas cuantificables para una mejor implementación del Programa 21. Esta Cumbre tenía cinco áreas prioritarias, y una de ellas era el tema de la Energía.

Así mismo, dando respuesta a estas actuaciones mundiales la Unión Europea ha desarrollado normativas:

- La **Directiva 93/76 de 13.09.93 (SAVE)**, que tiene por objetivo conservar la calidad del medio ambiente y garantizar el uso racional de los recursos energéticos, estableciendo cuatro puntos de actuación básica: la certificación energética de los edificios, la facturación individualizada de la energía, la mejora en los aislamientos y la inspección periódica de las calderas.
- El **Libro Verde**, 2001, “Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético”, se han planteado tres retos:
 1. Seguridad de abastecimiento.
 2. Cambio Climático.
 3. Equilibrio entre Oferta y Demanda
- La **Directiva 2002/91**, que fue aprobada el 16 de Diciembre de 2002, como un instrumento jurídico complementario, que instaure acciones más concretas que las indicadas en la Directiva SAVE (la 93/76/CE), para aprovechar el gran potencial de ahorro energético todavía sin desarrollar y para armonizar las actuaciones de los distintos Estados miembros de la UE.
- **Objetivo 20/20/20**, propuesto en 2010, cuyo tema principal es en materia de clima y energía, y que pretende la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al menos en un 20% en comparación con los niveles de 1990, o en un 30% si se dan las condiciones establecidas, además de incrementar el porcentaje de las fuentes de energía renovables en el consumo final de energía hasta un 20%, y en mejorar un 20 % la eficacia energética.

Paralelamente, a nivel nacional, se han ido desarrollando numerosas normativas térmicas:

- **1957 Normas MV** competencia del Ministerio de la Vivienda. En estas normas no existía ninguna regulación térmica que obligara a las figuras de la edificación (técnicos, promotores o constructores) a incorporar aislamientos térmicos en el diseño, por lo que las viviendas construidas bajo estas normas, y que van hasta el año 1975, no disponen de ningún tipo de aislamiento térmico.
- **1977 NBE Normas Básicas de la Edificación (NBE)**, con las que el Gobierno decidió crear un marco unificado para toda la normativa relacionada con la edificación. Su aplicación era

de obligado cumplimiento para los agentes del sector. A las NBE se le añadieron las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE) para completar el marco regulatorio. Estas especificaciones no tenían carácter obligatorio y servían como el desarrollo operativo de las NBE.

- **1979 NBE-CTE 79** Norma básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas en los Edificios. Por el Real Decreto 2429, se aprobó esta normativa que fue la primera en regular las exigencias térmicas mínimas que debía tener un edificio y que confirmaban las primeras medidas adoptadas.
- 1999 se publica la **Ley 38/1999** de 5 de noviembre de Ordenación de la Edificación que tiene como principal objetivo regular el sector de la edificación. En materia de reglamentación era preciso actualizar una normativa que había quedado profundamente obsoleta por lo que la ley insta y autoriza al Gobierno para la aprobación de un Código Técnico de la Edificación, mediante Real Decreto que establezca las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. La Ley de Ordenación de la Edificación responde así a la necesidad de actualizar este conjunto de normas, pero también de completar una regulación que hasta 1999 había sido dispersa y poco clara.
- **2006 CTE** Código Técnico de la Edificación, que viene a plasmar en especificaciones los objetivos de la LOE.
- **2013 CTE Real Decreto 235/2013**, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios:
-Cuando se construyan, vendan o alquilen edificios o unidades de éstos, el certificado de eficiencia energética o una copia de éste se deberá mostrar al comprador o nuevo arrendatario potencial y se entregará al comprador o nuevo arrendatario, en los términos que se establecen en el Procedimiento básico.
Se recoge además la necesidad de proyectar edificios de consumo de energía casi nulo.
 1. Los Estados miembros se asegurarán de que:
 - a) a más tardar el 31 de diciembre de 2020, todos los edificios nuevos sean edificios de consumo de energía casi nulo, y
 - b) después del 31 de diciembre de 2018, los edificios nuevos que estén ocupados y sean propiedad de autoridades públicas sean edificios de consumo de energía casi nulo.
- **2013 RITE** Reglamento Instalaciones Térmica en los Edificios (revisión del RITE 2007), establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene a través de las instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía.
- **Ley de Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbanas.**
 1. Potenciar la rehabilitación edificatoria y la regeneración y renovación urbanas, eliminando trabas actualmente existentes y creando mecanismos específicos que la hagan viable y posible.
 2. Ofrecer un marco normativo idóneo para permitir la reconversión y reactivación del sector de la construcción, encontrando nuevos ámbitos de actuación, en concreto, en la rehabilitación edificatoria y en la regeneración y renovación urbanas.
 3. Fomentar la calidad, la sostenibilidad y la competitividad, tanto en la edificación, como en el suelo, acercando nuestro marco normativo al marco europeo, sobre todo en relación con los objetivos de eficiencia, ahorro energético y lucha contra la pobreza energética.

En nuestros días, la UE y España han realizado políticas más activas, y normativas para mejorar la eficiencia energética de los edificios, tanto de los nuevos como de los existentes.

En estos momentos, en España contamos con la siguiente normativa al respecto:

- Código Técnico de la Edificación (**CTE**), que entró en vigor en 2008, que según las estimaciones del IDAE puede representar un ahorro energético de entre el 30 y el 40%, y una reducción de las emisiones de CO₂ de entre el 40 y el 55% en el sector.
- El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, **RITE** (2013).
- **Real Decreto 47/2007** de certificación de eficiencia energética de edificios. Traspone la metodología de cálculo establecida en la Directiva 2002/91/CE (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD). Actualizada recientemente por la Directiva 2010/31/UE. Establece la obligación de poner a disposición de los compradores o usuarios de los edificios un certificado de eficiencia energética. Este certificado deberá incluir información objetiva sobre las características energéticas de los edificios, de forma que se pueda valorar y comparar su eficiencia energética, con el fin de favorecer la promoción de edificios de alta eficiencia energética y las inversiones en ahorro de energía. Este Real Decreto está dirigido no sólo a los edificios de nueva construcción, sino también a aquellos edificios existentes que sufran modificaciones, reformas o rehabilitaciones y que tengan una superficie útil superior a 1.000 m² y en los que se renueve más del 25 % del total de sus cerramientos.
- Estrategia Española de Eficiencia Energética (E4). Plan de Acción 2005-2007 de Ahorro y Eficiencia Energética, y Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética. Objetivos concretos de reducción de emisiones de CO₂ y ahorros energéticos por sectores.
- El Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012. Real Decreto 2066/2008, de 12 de diciembre, por el que se regula el Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012.

Además, a nivel andaluz habría que sumar:

- Plan integral de Fomento para el sector de la Construcción y Rehabilitación Sostenible de Andalucía.

El objeto principal de la rehabilitación energética es la modificación de las envolventes, desarrollando cubiertas y cerramientos (incluyendo sus huecos) y cubiertas acordes a las necesidades de confort, aprovechando el desarrollo de nuevas tecnologías para disminuir la demanda de instalaciones. De esta manera se pretende conseguir una reducción del consumo energético en las viviendas, sobre todo de climatización.

2. Estado del arte

El estado de la cuestión se centra en estudios experimentales realizados en módulos de ensayo relativos a aspectos ambientales y energéticos en la edificación. Engarzan, por tanto, con lo que se ha realizado en este trabajo fin de grado. La relación no es exhaustiva pero sí lo suficientemente amplia para ofrecer un panorama representativo de las principales investigaciones. El orden con el que se presentan los trabajos es el cronológico.

El proyecto de investigación de la Comisión Europea **PASSYS³** (PASSive Solar Components and SYStems Testing, 1986-1992) usaba celdas de ensayo exteriores (Fig.7) para analizar el funcionamiento térmico y solar de los componentes de los edificios. Las instalaciones de las celdas estaban estandarizadas: células idénticas, equipadas con los mismos sensores, sistemas de refrigeración y calefacción, hardware y software para procesar datos. Estas celdas fueron instaladas en 12 lugares diferentes en Europa aplicando el mismo método de test.

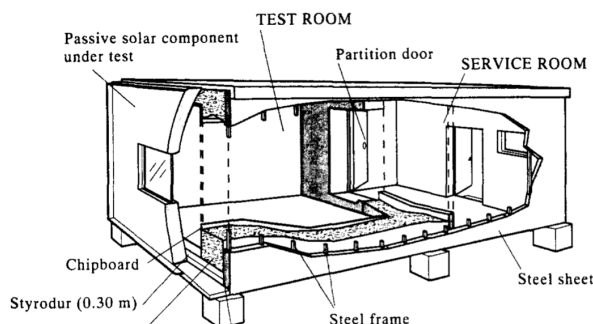


Fig. 7. Célula de ensayo. Fuente: CEC. "The Use of Outdoor Test Cells for Thermal and Solar Building Research within the PASSYS Project". *Building and Environment*.1993.

P. La Roche y M. Milne⁴ desarrollaron un prototipo de termostato controlado por ordenador que puede gestionar el flujo de aire según las necesidades de refrigeración del edificio y los recursos del ambiente. Este sistema de control inteligente mide la temperatura en el interior y el exterior, y aplica normas para controlar el extractor de la vivienda, además del horno y el aire acondicionado. Esta investigación también cuantifica los efectos de la modificación de la inercia térmica y del área de la ventana en el confort interior. El experimento confirma, a través de módulos de ensayo (Fig.8) , que las ventanas pequeñas y con mayor cantidad de masa actúan mejor que ventanas más grandes y con menos masa.

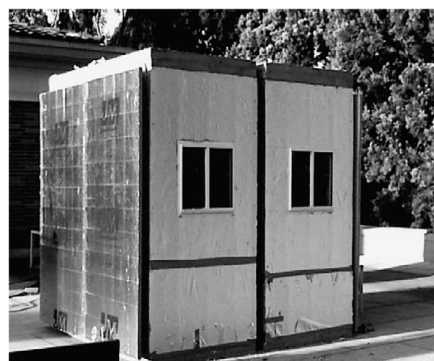


Fig. 8. Célula de ensayo. Fuente: Pablo La Roche y Murray Milne. "Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller". *Solar Energy*. 2004.

³ CEC. "The Use of Outdoor Test Cells for Thermal and Solar Building Research within the PASSYS Project". *Building and Environment*. Vol. 28, No.2, pp 107-113. 1993.

⁴ Pablo La Roche y Murray Milne. "Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller". *Solar Energy*. No. 77, pp 421-434, 2004.

H. Manza⁵ et al. analizan que la validación empírica de la construcción de códigos de simulación energética es un componente importante en la comprensión de la capacidad y limitaciones del software. En el marco de la Tarea 34 / Anexo 43 de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), se llevó a cabo una serie de experimentos en una celda de pruebas al aire libre (Figs.9 y 10). El objetivo de estos experimentos era proporcionar un conjunto de datos de alta calidad, establecidos para los desarrolladores de código y modeladores, para validar sus modelos de captación solar para las ventanas con y sin sistema de protección solar. En esta investigación se proporcionó una descripción de las especificaciones necesarias para el modelado de estos experimentos, que incluyen información acerca de la ubicación del sitio de prueba, la configuración experimental, propiedades de las células geométricas y termofísicas incluyendo incertidumbres estimadas. Las propiedades térmicas globales calculadas de las celdas fueron confirmadas mediante la realización de un experimento en estado estacionario sin ganancias solares.



Figs. 9 y 10. Células de ensayo. Fuente: H. Manz, P. Loutzenhiser, T. Frank, P.A. Strachan, R. Bundi, G. Maxwell. "Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes—Experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis". *Building and Environment* . 2006.

J.R.Gosselin⁶ et al. realizan un estudio experimental sobre ventanas con triple vidrio y doble flujo de aire. Una ventana de flujo de aire tiene un gran potencial para la conservación de energía y la mejora de la calidad del aire interior en los edificios residenciales, aunque las existentes utilizan una única ruta de flujo de aire, y su rendimiento energético se puede estudiar usando varios modelos controlados a través de hardware. Una ventana de doble flujo de aire con triple acristalamiento puede conservar más energía que una ventana de un solo flujo de aire, ya que el primero funciona como un intercambiador de calor. Sin embargo, no hay programas de ordenador adecuados que puedan ser usados para evaluar la eficiencia energética de la ventana de doble flujo de aire. En esta investigación se propone un método de cálculo de cuatro pasos que utiliza CFD (Computacional Fluid Dynamics) y

⁵ H. Manz, P. Loutzenhiser, T. Frank, P.A. Strachan, R. Bundi, G. Maxwell. "Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes—Experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis". *Building and Environment* . No, 41, pp 1784-1797, 2006.

⁶ Jennifer R. Gosselin, Qingyan (Yan) Chen. "A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window". *Energy and Buildings* . No, 40, pp 452-458, 2008.

cálculos de radiación codificados para determinar el flujo de aire y la transferencia de calor a través de la ventana. Se utilizaron las pruebas experimentales en un sistema de ventanas de doble flujo de aire a gran escala para obtener diversas temperaturas del aire y de la superficie ventana interior y exterior para validar la simulación por ordenador (Fig.11).

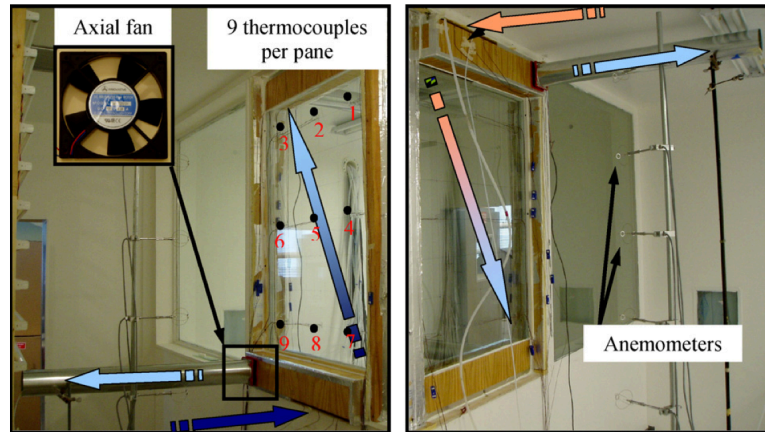


Fig. 11. Célula de ensayo. Fuente: Jennifer R. Gosselin, Qingyan (Yan) Chen. "A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window". *Energy and Buildings* . 2008.

P.A. Strachan y L. Vandaele⁷ exponen la construcción y el desarrollo de las células de ensayo al aire libre PASSYS / PASLINK , que fueron financiadas por la Comisión Europea, con el objetivo de proporcionar entornos de pruebas de alta calidad para cuantificar el rendimiento de los componentes de edificios solares pasivos (Figs.12 y 13). A través de los años desde que se encargaron las células de ensayo originales, el concepto inicial para las pruebas al aire libre se ha ampliado para incluir otros tipos de células de prueba. Se han hecho importantes mejoras para los procedimientos experimentales y técnicas de análisis, y se han probado una amplia gama de componentes. Se describen los experimentos más representativos que se han realizado utilizando estos entornos de prueba al aire libre, indican algunos de los análisis relacionados, y muestra el tipo de información que se puede obtener a partir de tales pruebas. Esto demuestra la forma en que el rendimiento de los componentes puede determinarse en el ambiente externo real. Los estudios de casos escogidos van desde la construcción de pruebas de componentes, dentro de los proyectos de investigación de la CE, así como de pruebas comerciales y de componentes de construcción convencionales a nuevos sistemas de fachada integrados.



Figs. 12 y 13. Células de ensayo. Fuente: P.A. Strachan y L. Vandaele. "Case studies of outdoor testing and analysis of building components". *Building and Environment* . 2008.

⁷ P.A. Strachan y L. Vandaele. "Case studies of outdoor testing and analysis of building components". *Building and Environment* . No. 43, pp 129-142, 2008.

V. Leal y E. Maldonado⁸ crearon la ventana SOLVENT, un innovador sistema de acristalamiento que implica el uso de un marco giratorio, un vidrio de absorción y un canal vertical con ventilación natural, con el fin de mejorar el equilibrio entre la comodidad visual y la eficiencia energética de las ventanas. Las herramientas disponibles para la simulación del comportamiento de la ventana, en términos de comodidad visual y de comportamiento térmico y energético, son complejas y potencialmente dependientes de muchos parámetros de calibración, tales como los coeficientes de convección y el número de nodos en una red de flujo de aire. Métodos diferentes de modelización pueden conducir a una gran variabilidad en los resultados obtenidos.

Por tanto, es esencial que los modelos sean compatibles con las mediciones que puedan, por un lado, ayudar a optimizar el modelado de componentes y, por otra parte, asegurar que los resultados globales proporcionados por el modelo son realistas. En el caso de la ventana SOLVENT, un prototipo montado en una celda de prueba PASLINK en Oporto (Portugal), jugó un papel fundamental en este proceso (Fig.14). Los resultados del seguimiento fueron utilizados para: (a) evaluar la calidad de los resultados obtenidos con un modelo de caso base; (b) desarrollar modelos mejorados para el flujo de aire y de la convección de calor en el canal de aire vertical; (c) la validación de los resultados para las cargas de calefacción y refrigeración globales obtenidos con el modelo optimizado; y (d) la calibración de los parámetros necesarios para la simulación de la luz del día exacta con radiación. Una vez que el modelo de componente se ha optimizado y validado, se aplica entonces en la construcción de modelos globales realistas para estudios detallados de rendimiento.



Fig.14. Células de ensayo. Fuente: V.Leal, E.Maldonado. "The role of the PASLINK test cell in the modelling and integrated simulation of an innovative window". *Building and Environment*, 2008.

P.A. Strachan⁹ afirma que la determinación de los parámetros de rendimiento para componentes de construcción nuevos requieren que las pruebas se lleven a cabo al aire libre. Por lo general es difícil hacer esto cuando los componentes se encuentran en un edificio a gran escala debido a la dificultad en el control de los experimentos. Las células de prueba (Fig.15) permiten que los componentes sean probados de forma real, pero con condiciones controladas. Los experimentos de alta calidad al aire libre y los métodos de análisis de identificación pueden ser utilizados para determinar los parámetros clave que cuantifican el rendimiento. Esto es importante para conseguir medidas estandarizadas que

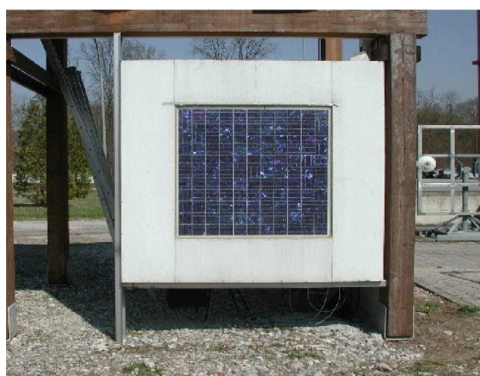


Fig.15. Células de ensayo. Fuente: P.A. Strachan. "Simulation support for performance assessment of building components". *Building and Environment* . 2008.

⁸ V.Leal, E.Maldonado. "The role of the PASLINK test cell in the modelling and integrated simulation of an innovative window". *Building and Environment* . No, 43, pp 217-227, 2008.

⁹ P.A. Strachan. "Simulation support for performance assessment of building components". *Building and Environment* . No, 43, pp 228-236, 2008.

caracterizan el edificio de interés, si se trata de un componente solar pasivo como una ventana de ventilación, o un componente activo tal como un módulo fotovoltaico híbrido.

Sin embargo, dichas pruebas y análisis no determina cómo se comportará un componente en concreto cuando se coloca en un edificio real en un lugar con un clima particular. Para esto, es necesario modelar todo el edificio con y sin el componente de interés. Se ha desarrollado un procedimiento que ha sido aplicado en varios proyectos importantes de Europa, que consiste en la calibración de un modelo de simulación con los datos de las pruebas al aire libre y luego aplicándolo a uno o más edificios y ubicaciones para determinar el rendimiento en la práctica de la construcción de dichos componentes.

En este caso se establece la metodología que se ha desarrollado y aplicado en estos proyectos europeos, que se basaba en la demostración para la aplicación a la evaluación del rendimiento de los módulos fotovoltaicos híbridos.

A. Piccolo¹⁰ describe los resultados de las pruebas experimentales y modelos de simulación por ordenador destinados a evaluar el comportamiento de una ventana electrocrómica con respecto al control solar en los edificios. La investigación se lleva a cabo por una célula de prueba (Fig.16) equipada con una unidad pequeña de doble acristalamiento, donde un panel consiste en un dispositivo electrocrómico y el otro de un vidrio claro. El rendimiento del dispositivo en el control de transmitancia de luz global, el control interno de temperatura y el control de ganancia de calor solar, se analizan en verano bajo condiciones ambientales reales. Estos experimentos y análisis numéricos muestran que la disminución de la carga de calor que afecta a la célula de prueba, normalizado respecto a un vidrio claro, es máximo cuando el vidrio electrocrómico se ajusta a su estado de transmisión más bajo, y asciende a aproximadamente el 50% para la orientación oeste y aproximadamente 60% para la orientación sur. En este último, la reducción de la carga térmica registrada cuando la carga eléctrica es accionada en el modo dinámico (31%) es similar a la de un acristalamiento reflectante de baja emisividad.



Fig.16. Células de ensayo. Fuente: A. Piccolo. "Thermal performance of an electrochromic smart window tested in an environmental test cell". *Energy and Buildings*. 2010.

¹⁰ A. Piccolo. "Thermal performance of an electrochromic smart window tested in an environmental test cell". *Energy and Buildings*. No. 42, pp 1409-1417, 2010.

J.S. Carlos¹¹ et al. realizan una investigación sobre los sistemas de ventanas con doble vidrio. Plantean precalentar el aire para la ventilación entre los vidrios de la ventana antes de que éste pase al interior de edificio, de manera que previenen las fugas de aire y la falta de confort térmico. Mediante unas aberturas realizadas en la base del marco por su parte exterior y en la zona superior del mismo por su cara interior, se hace pasar el aire entre los vidrios de manera que éste se caliente debido a la radiación solar y, posteriormente el efecto chimenea causado por la diferencia de presión del aire lo haga ascender y penetrar en el interior del edificio. Mediante un programa informático, además de la experimentación sobre celdas de ensayos (Fig.17) se obtienen resultados que indican una alentadora mejora térmica de la ventana con doble vidrio ventilado, ofreciendo por sí misma una alternativa a la ventilación natural para refrigerar espacios.



Fig.17. Células de ensayo. Fuente: Jorge S. Carlos , Helena Corvacho , Pedro D. Silva , J.P. Castro-Gomes. "Modelling and simulation of a ventilated double window" *Applied Thermal Engineering*. 2011.

A. Bontemps¹² et al. han realizado un estudio experimental y numérico de simulación de la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM) en los componentes de construcción para la gestión térmica de una celda de ensayo solar pasiva. El estudio experimental se llevó a cabo en una célula de ensayos (Fig.18) exterior constituida por dos pequeñas habitaciones separadas con una pared que contiene PCM. Se estudió una pared específica hecha de ladrillos de vidrio huecos llenas de PCM. Para este experimento se probaron tres PCM diferentes: ácidos grasos, parafina e hidratos de sal cuyas temperaturas de fusión son 21°C, 25°C y 27.5°C, respectivamente. Las temperaturas interiores y exteriores se midieron con termopares. Además se colocaron diez fluxómetros en el centro de cada pared, que permitieron medir los flujos de calor a través de las paredes. Las pruebas se llevaron a cabo en condiciones climáticas reales. Un modelo numérico unidimensional ha sido desarrollado para simular el proceso de transferencia de calor transitoria en las paredes.



Fig.18. Células de ensayo. Fuente: André Bontemps, Maha Ahmad, Kevin Johannès, Hébert Sallée. "Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls". *Energy and Buildings*. 2011.

¹¹ Jorge S. Carlos , Helena Corvacho , Pedro D. Silva , J.P. Castro-Gomes. "Modelling and simulation of a ventilated double window" *Applied Thermal Engineering*. No. 31, pp. 93-102, 2011.

¹² André Bontemps, Maha Ahmad, Kevin Johannès, Hébert Sallée. "Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls". *Energy and Buildings*. No. 43, pp 2456-2461, 2011.

S. Guichard¹³ et al. crearon un experimento a partir de un modelo numérico para el estudio del comportamiento térmico de una azotea equipada con materiales de cambio de fase (PCM). El estudio pone en evidencia los primeros resultados del modelo propuesto, basados en el método de la capacidad de calor aparente. El modelo se integró en un código de simulación de edificios multizona, y es capaz de predecir tanto la temperatura de cada componente constructivo como el impacto térmico del PCM instalado en los edificios. Se ha realizado un primer estudio experimental para un clima tropical y húmedo, utilizando una célula de prueba (Fig.19) al aire libre a gran escala equipada con PCM instalado como un componente de la cubierta. Esto permitió dar elementos de validación para el modelo numérico, a través de un proceso de validación que incluye comparaciones con otras mediciones.



Fig.19. Células de ensayo. Fuente: André Bontemps, Maha Ahmad, Kevin Johannès, Hébert Sallée. "Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls". *Energy and Buildings*. 2011.

N.M. Mateus¹⁴ et al. desarrollaron un estudio de validación de simulación térmica, partiendo de la precisión típica que un ingeniero de simulación térmica experimentado puede esperar obtener para la simulación de una habitación conectada a una fachada de doble piel con ventilación natural (Fig.20). La herramienta de simulación térmica EnergyPlus se utiliza para predecir las temperaturas del aire y de la superficie de una célula de prueba expuesta al exterior. El enfoque de validación utilizado no permite la



Fig.20. Células de ensayo. Fuente: Nuno M. Mateus, Armando Pinto, Guilherme Carrilho da Graca. "Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell". *Energy and Buildings*. 2014.

¹³ Stéphane Guichard, Frédéric Miranville, Dimitri Bigot, Harry Boyer. "A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate: Model description and elements of validation". *Energy and Buildings*. No, 70, pp 71-80 2014.

¹⁴ Nuno M. Mateus, Armando Pinto, Guilherme Carrilho da Graca. "Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell". *Energy and Buildings*. No, 75, pp 511-522, 2014.

puesta a punto del modelo de simulación por ensayo y error, e incluye un análisis de sensibilidad sobre el impacto de las diferentes opciones de simulación tales como: número de zonas térmicas, transferencia de calor del suelo y exactitud de los datos de radiación solar. El análisis de los resultados es consecuente con el objetivo de ingeniería de aplicaciones, centrándose en los indicadores estándar. Los resultados muestran similitud entre la simulación y experimentación, con un error medio de simulación en el aire y la temperatura radiante de 1.4°C, y un error máximo diario con un promedio de 2°C.

Chin-Huai Young¹⁵ et al. afirmaron que integrar paneles fotovoltaicos en edificios es uno de los mejores métodos para la generación de energía aprovechando el sol como fuente de energía. Para promover y responder al concepto de BIPVs (Building Integrated Photovoltaics), este estudio desarrolló un tipo de vidrio multifuncional denominado HISG (Heat Insulation Solar Glass) que difiere de los módulos fotovoltaicos transparentes tradicionales, proporcionando funciones tales como aislamiento térmico y auto-limpieza, además de la generación de energía. Este estudio también planificó todo lo relativo a la seguridad de la futura instalación HISG en muros cortina en edificios de gran escala. Además, se proporcionó una discusión completa sobre el desempeño de ahorro de energía de HISG y las aplicaciones prácticas pertinentes. Se construyeron dos viviendas experimentales (Fig.21), para las que emplearon independientemente HISG y una sola capa de vidrio templado. El clima de Taiwan fue adoptado como el estado del medio ambiente para el experimento. Se analizaron la variación de temperatura interior y la energía consumida por los aparatos de aire acondicionado y calentadores.



Fig.21. Células de ensayo. Fuente: Chin-Huai Young, Yi-Lin Chen, Po-Chun Chen. "Heat insulation solar glass and application on energy efficiency buildings". *Energy and Buildings*. 2014.

¹⁵ Chin-Huai Young, Yi-Lin Chen, Po-Chun Chen. "Heat insulation solar glass and application on energy efficiency buildings". *Energy and Buildings*. No. 78, pp 66-78, 2014.

3. Metodología.

La experimentación se realiza sólo en Madrid, zona climática D3. No obstante, los resultados pueden ser totalmente válidos en localizaciones de similar latitud y zona climática. Incluso pueden ser extrapolados con cierta aproximación a otras zonas climáticas españolas, como las más interiores de Andalucía, no muy alejadas del clima de Madrid. En cualquier caso, y por lo que se refiere a Sevilla, es una cuestión que habrá que validar cuando estén construidas las celdas de ensayo que el grupo de investigación TEP-130 está ejecutando en el Centro Internacional de la Universidad de Sevilla, lo que está previsto que finalice a finales de julio de 2015.

En concreto, los módulos de ensayo están ubicados en la parcela N° 401 del Campus de Montegancedo de la UPM, Comunidad de Madrid, al lado este del centro tecnológico “Cedint”, contiguo a los campos de deportes de la zona (Fig.22). El Grupo TISE de la UPM, responsable de la construcción de los módulos y su mantenimiento, denomina a esta parcela “Plataforma de Automatización de Arquitectura Sostenible (PAAS)”. Consta de los prototipos SD07-1, SD07-2, SD10 y 8



módulos experimentales (Fig.23). Para este trabajo fin de grado se han empleado datos de la monitorización de tres de estos módulos.

Fig. 22. Imagen aérea del Campus de Montegancedo. Fuente: Google Maps.

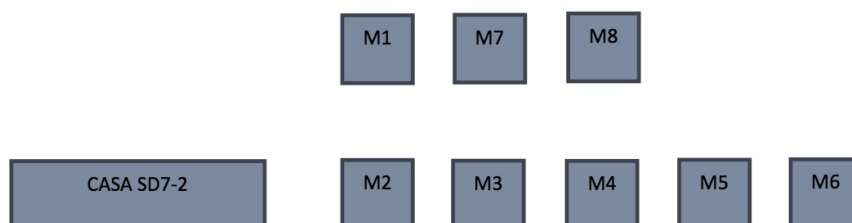


Fig. 23. Organización de todos los módulos experimentales. Fuente: Proyecto REFAVIV.

Los tres módulos son todos adiabáticos en todas sus caras (paredes, suelo y techo), excepto en la cara que reproduce la solución de fachada que se quiere ensayar. Eso significa que, salvo en esta última, disponen de una muy gruesa pared de aislamiento que reduce al mínimo la transmisión de calor a través de ellas. En realidad sólo se produce transferencia de calor a través de la solución de fachada ensayada.

De acuerdo a los objetivos del Proyecto del Plan Nacional I+D+i REFAVIV, cada uno de los tres módulos posee una solución constructiva diferente. El primero, M1, es el denominado módulo base y su solución de fachada es una solución tradicional de fábrica de cimbra de ladrillo, cámara de aire y tabique de ladrillo hueco simple. Como el objetivo del proyecto de investigación es conocer el comportamiento energético de soluciones de rehabilitación de esta fachada tradicional, el módulo M2 es una solución de Fachada Ventilada (FV) aplicada sobre la fachada tradicional, y el módulo M3 es una solución de Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE) también aplicada a la fachada tradicional.

Los tres módulos están situados de modo que sus fachadas ensayadas están todas orientadas al sur y, además, el color del acabado exterior en las tres fachadas es el mismo (Fig.24). Los tres están climatizados (frío/calor) mediante equipos partidos autónomos de expansión directa.

Formando parte del proyecto de monitorización de estos tres módulos, se ha dispuesto una serie de sondas y termopares para medir la temperatura del aire tanto en el interior de los módulos como en las capas de las soluciones de fachada.



Fig.24. Acabado exterior de los módulos. Fuente: Proyecto REFAVIV.

A continuación se da una ficha por cada uno de los tres módulos, donde se dan características de su monitorización de estos tres módulos (Figs. 25, 26 y 27).

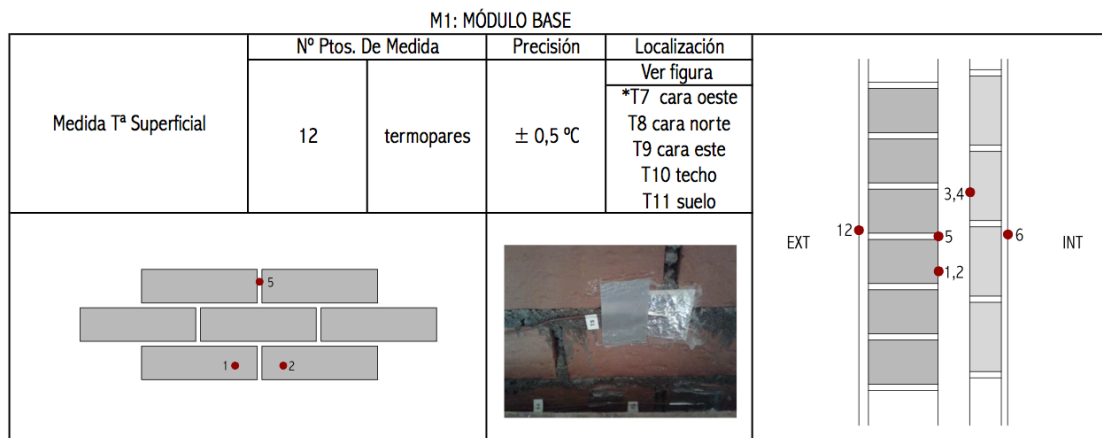


Fig. 25. Características de la monitorización del módulo M1. Fuente: Elaboración propia.

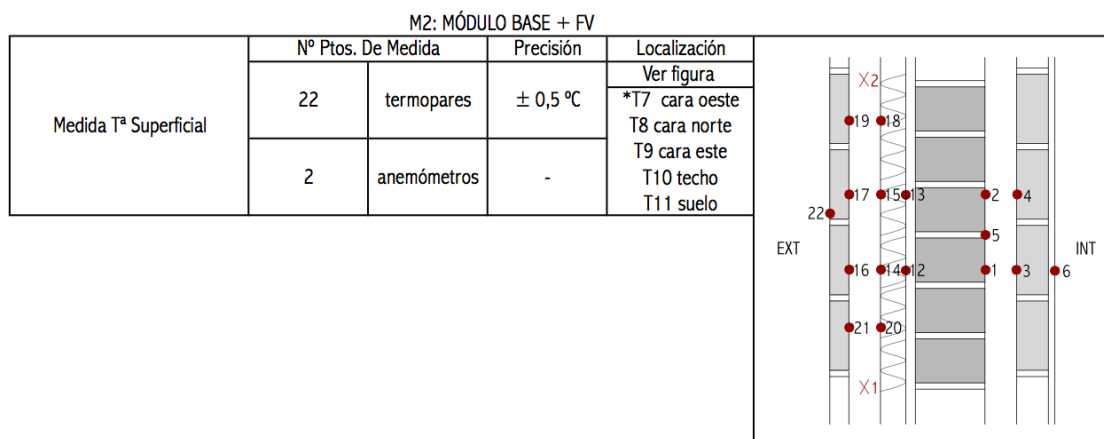


Fig. 26. Características de la monitorización del módulo M2. Fuente: Elaboración propia.

M3: MÓDULO BASE + SATE				
Medida Tª Superficial	Nº Ptos. De Medida		Precisión	Localización
	16	termopares	± 0,5 °C	Ver figura *T7 cara oeste T8 cara norte T9 cara este T10 techo T11 suelo

Fig. 27. Características de la monitorización del módulo M3. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 28 se indican las principales prescripciones de la medidas realizadas en el ambiente interior de los módulos, así como de su climatización.

M1, M2, M3						
Medida Condiciones Ambientales Interiores	Nº Ptos. De Medida		Precisión		Localización	
	1	Sensor SCR110 Schneider	Temperatura	± 0,5 °C		
			H. Relativa	± 2 %		
Calidad aire			± 2 %			
Control Temperatura interior SPLIT	Ptos. De Medida		Temperatura			
	Contador de consumo		Invierno	Verano		
			20°C	23°C		

Fig. 28. Características de la monitorización del interior de los módulos M1, M2 y M3. Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se ha expuesto anteriormente, el principal objetivo del trabajo es buscar relaciones entre la temperatura media exterior en cada época del año y el consumo de climatización para mantener el ambiente interior en condiciones de confort en cada uno de los módulos, según su solución de fachada. El hecho que los tres estén igualmente orientados (sur), y con el mismo color de acabado exterior, permite obviar en una primera aproximación la influencia de la radiación solar, especialmente porque los resultados los asociamos a un periodo temporal, sin cambios sustanciales de los valores de la radiación solar para un misma hora del día de ese mes. Por tanto, a partir de los datos obtenidos a

través de las diferentes sondas de temperatura, ubicadas tanto en el interior como en el exterior de las celdas de ensayo, se ha realizado una serie de gráficas correspondientes a dos periodos estacionales, verano e invierno, para poder relacionar las temperaturas medias exteriores con los consumos de climatización en cada módulo.

En ambos periodos, para el proceso de generación de resultados se ha procedido con el mismo método:

- a. Gráficas por periodos quincenales, que nos permiten una observación con mayor detalle.
- b. Gráficas por periodos mensuales o incluso algo superiores, que nos dan una valoración de mayor espectro.
- c. Gráfica del periodo estacional, que nos permite una lectura global de los resultados en ese periodo.

Se detalla a continuación las gráficas elaboradas en los dos periodos estacionales:

A. Período de verano.

1. Gráfica de evolución de la temperatura exterior e interior de los módulos (16-28 julio).

Los módulos M1, M2 y M3 estuvieron en libre evolución, es decir, estando desactivada la instalación de climatización. Por tanto, no hubo consumo asociado en este periodo. Estas medidas fueron realizadas para cubrir objetivos del proyecto REFAVIV y se presentan aquí porque nos permite obtener el desfase horario de la onda de temperaturas en el periodo de verano (Fig. 29).

2. Gráficas por periodos quincenales . En todas ellas los tres módulos estuvieron climatizados y, por tanto, con consumo eléctrico asociado.

- 2.1. Gráfica 16-30 junio.

- 2.2. Gráfica 1-15 julio.

- Período Libre Evolución (16-28 julio)

- 2.3. Gráfica 1-15 agosto.

- 2.4. Gráfica 16-31 agosto.

- 2.5. Gráfica 1-15 septiembre.

3. Gráficas por periodos mensuales o superiores con homogeneidad de comportamiento.

- 3.1. Gráfica 16 junio-15 julio.

- 3.2. Gráfica 1 agosto-15 septiembre.

4. Gráfica del periodo de estación de verano.

B. Período de invierno.

1. Gráfica de evolución de la temperatura exterior e interior de los módulos (13-27 enero). Igualmente los módulos estuvieron en libre evolución en este periodo durante el invierno. Nos permite obtener el desfase horario de la onda de temperaturas en el periodo de invierno (Fig. 39).

2. Gráficas por periodos quincenales.
 - 2.1. Gráfica 16-31 diciembre.
 - 2.2. Gráfica 1-12 enero.
-Período Libre Evolución (13-27 enero)
 - 2.3. Gráfica 1-15 febrero.
 - 2.4. Gráfica 16-28 febrero.
 - 2.5. Gráfica 1-15 marzo.

3. Gráficas por periodos mensuales o superiores
 - 3.1. Gráfica 16 diciembre-12 enero.
 - 3.2. Gráfica 1 febrero-15 marzo.

4. Gráfica del periodo de estación de invierno.

A. Período de verano

Período Libre evolución: Desfase térmico. 16-28 julio.

Los periodos de libre evolución se caracterizan por que la temperatura interior de cada célula no se ve influenciada por la climatización que está desactivada. Por tanto, no hay consumo de climatización y la evolución de la temperatura sólo dependerá de la temperatura exterior y de la inercia térmica de la solución de fachada. Asociada a esta última habrá una amortiguación y un desfase de la onda de temperaturas.

Para poder calcular el desfase, se han seleccionado varios puntos del gráfico de temperaturas en el tiempo, coincidentes con los máximos de cada una de las cuatro ondas representadas (temperatura exterior y temperaturas interiores de M1, M2 y M3) para un día en concreto (Fig. 29). Se puede observar cómo el valor máximo de la temperatura exterior para un día cualquiera tendrá sus correlativos máximos para cada módulo varias horas después.

Si designamos por δ el desfase de la onda térmica, es decir, la diferencia en tiempo de cuando la temperatura exterior es máxima y cuando la temperatura interior es máxima:

Para el módulo base (M1) $\delta_1 = 8$ h

Para el módulo FV (M2) $\delta_2 = 12$ h

Para el módulo SATE (M3) $\delta_3 = 12$ h

Una vez calculados los desfases, para cada módulo asociamos su consumo en un instante determinado no a la temperatura exterior en ese mismo instante (eso sería si apenas tuviese inercia térmica la fachada), sino a la temperatura exterior que había δ horas antes. Posteriormente, podemos relacionar el consumo de la climatización de un módulo durante un día de ese periodo estacional con la temperatura exterior media no de ese mismo día, sino de un periodo anterior con desfase δ respecto del primero, también de 24 h.

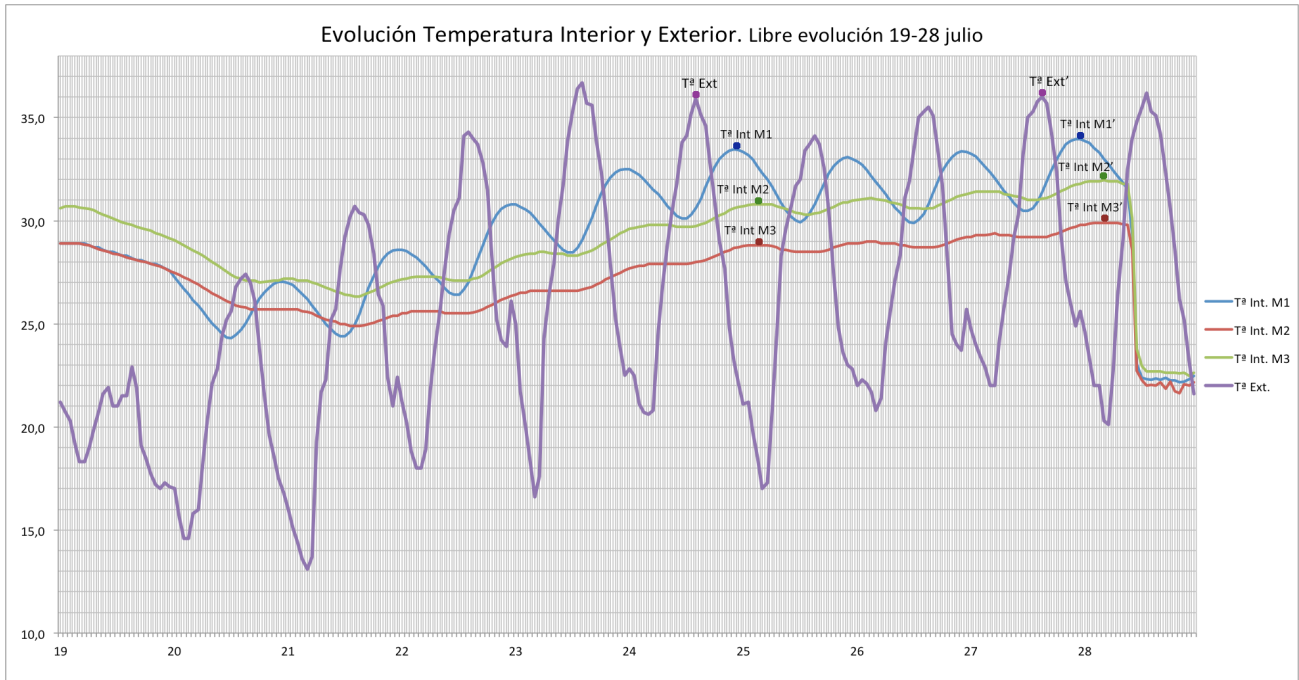


Fig. 29. Características de la monitorización del interior de los módulos M1, M2 y M3. Fuente: Elaboración propia.

Para las gráficas que expresan la relación Temperatura Exterior/Consumo se han utilizado los datos extraídos de las sondas, teniendo en cuenta el desfase de la onda térmica explicado anteriormente. Los valores del consumo seleccionados serán consumos diarios y los datos de temperaturas exteriores serán los valores obtenidos de hacer la media aritmética de las mismas durante las 24 horas siguientes a la hora seleccionada aplicando el desfase horario calculado. Con ayuda de la tabla I, se explica mediante un ejemplo la selección de los datos para uno de los días: el 16 de junio en los tres módulos: M1, M2 y M3.

Día	Consumo (Wh)			Temp.Ext	
	M1	M2	M3		
2014-06-15T12:00:02	566091,6667	782624	651162,8333	356	27,2
2014-06-15T13:00:02	566122,8333	782662,3333	651207,1667	355	28,3
2014-06-15T14:00:02	566179,3333	782710,1667	651254,1667	350	28,7
2014-06-15T15:00:02	566259,3333	782760,6667	651305,5	343	29,4
2014-06-15T16:00:02	566344	782808,3333	651366,3333	328	29,9
2014-06-15T17:00:02	566439	782868,5	651437,8333	311	27,8
2014-06-15T18:00:02	566536,8333	782924,6667	651507,5	277	25,8
2014-06-15T19:00:02	566641,3333	782976,3333	651580,5	195	23,6
2014-06-15T20:00:02	566738,1667	783037,1667	651646,5	29	22,2
2014-06-15T21:00:02	566825,1667	783098,3333	651707	0	20,6
2014-06-15T22:00:02	566891,1667	783137,8333	651750	0	18,5
2014-06-15T23:00:02	566945,5	783179,6667	651796,8333	0	16,5
2014-06-16T00:00:02	566996,6667	783221,3333	651839,5	0	15
2014-06-16T01:00:02	567039	783268,5	651880	0	14,2
2014-06-16T02:00:01	567077,6667	783302,5	651926	0	13,8
2014-06-16T03:00:01	567115,5	783350	651966,1667	0	13,5
2014-06-16T04:00:01	567146,5	783382,8333	652005,1667	0	12,8
2014-06-16T05:00:01	567178	783415,5	652050	11	13,5
2014-06-16T06:00:01	567209	783449	652082,6667	194	16,2
2014-06-16T07:00:01	567240,8333	783482,8333	652125,1667	275	18,1
2014-06-16T08:00:01	567271,8333	783517,3333	652159,3333	313	20,8
2014-06-16T09:00:01	567303,1667	783552,1667	652192	313	20,9
2014-06-16T10:00:01	567335	783594	652229,1667	342	23,1
2014-06-16T11:00:01	567367	783631	652268,6667	348	23,5
2014-06-16T12:00:01	567398,8333	783664	652301,1667	348	23,7
2014-06-16T13:00:01	567430,3333	783701,8333	652333,8333	333	25,7
2014-06-16T14:00:01	567462,1667	783743,8333	652370,5	280	26
2014-06-16T15:00:01	567494,8333	783777,3333	652415,5	257	24,8
2014-06-16T16:00:01	567562,8333	783811,1667	652460,8333	122	24,4
2014-06-16T17:00:01	567641,5	783860,3333	652511,5	163	22,9
2014-06-16T18:00:01	567721,8333	783903,1667	652564,1667	55	22,2
2014-06-16T19:00:01	567797,6667	783949,3333	652610,3333	145	21
2014-06-16T20:00:01	567865,6667	783999	652662,5	15	20
2014-06-16T21:00:01	567921,1667	784035	652699,8333	0	18,7
2014-06-16T22:00:01	567972,6667	784075,6667	652745,6667	0	17,5
2014-06-16T23:00:01	568016	784116,5	652786,6667	0	0

Tabla I. Datos de consumo y temperaturas exteriores para cada día. Fuente: Elaboración propia.

Día: 16 junio

→Valor del consumo diario en la celda M1 (celdas grises, columna M1) = 568016 Wh – 566996,6667 Wh = **1019,33 Wh**

→Valor de la temperatura exterior media (celda azul) = **20,4°C**

En la gráfica de evolución de temperaturas (Fig. 29) se ha comprobado que, para M1, el desfase entre la onda de temperatura exterior y la onda de temperatura interior es de 8h, de manera que se hará la media aritmética de la temperatura exterior de las 24 horas siguientes a partir del 15 de junio a las 16:00 h.

En la figura 30 se presentan para el M1 (base), por quincenas, las relaciones entre temperaturas medias exteriores desfasadas y consumos diarios de climatización en el periodo de verano (por simplicidad la hemos estimado entre el 16 de junio y el 15 de septiembre). No figura la quincena entre el 16 de julio y el 31 de julio, porque estuvo el módulo en libre evolución.

En las figuras 31 y 32 se presentan esas mismas relaciones para M2 (FV) y M3 (SATE), respectivamente.

Como se puede observar, en cada gráfica esa relación entre consumo de climatización y temperatura media exterior desfasada se ajusta bastante bien a una recta (regresión lineal) cuya ecuación también se recoge en cada caso.

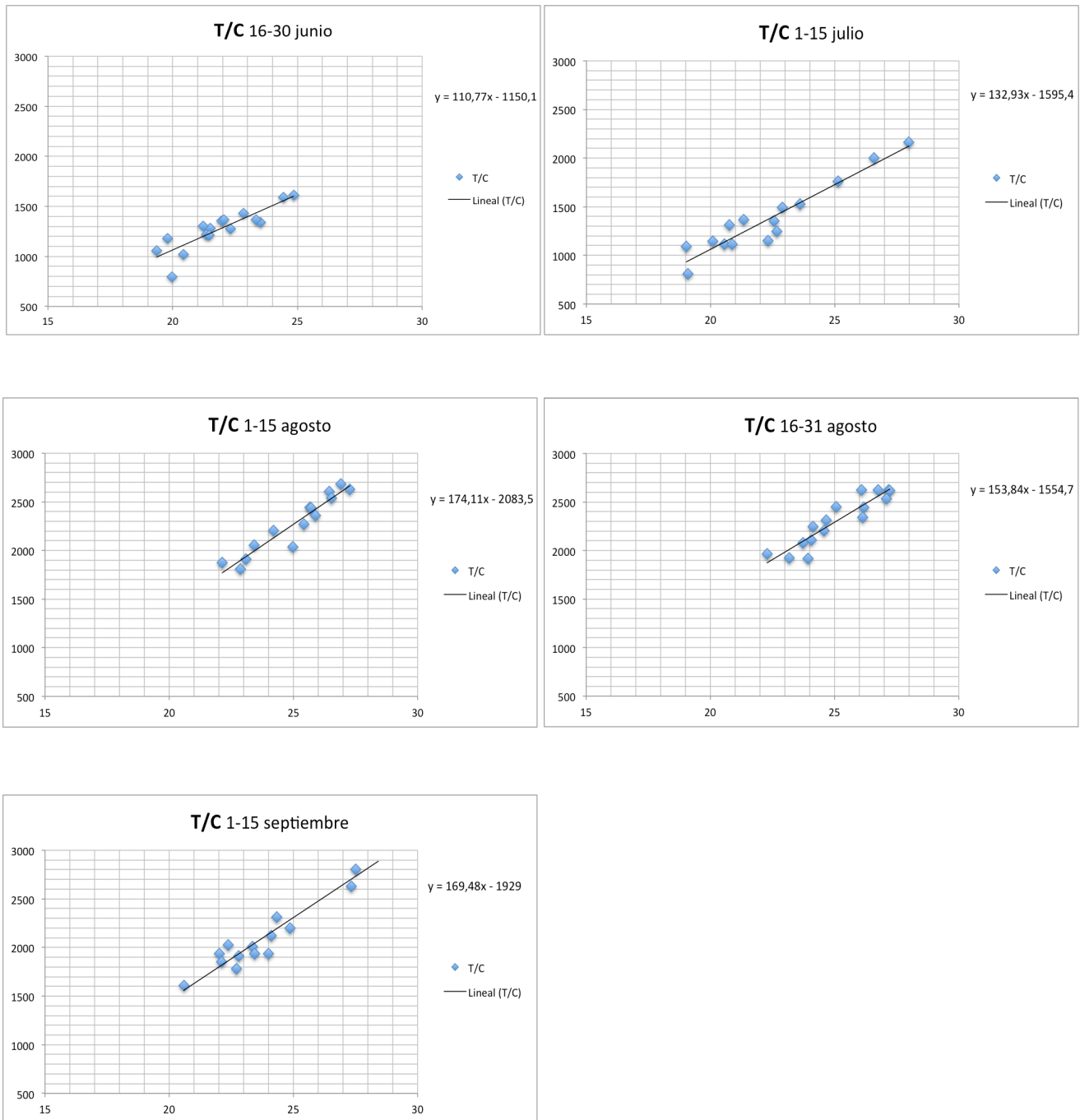


Fig. 30. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M1 por quincenas. Fuente: Elaboración propia.

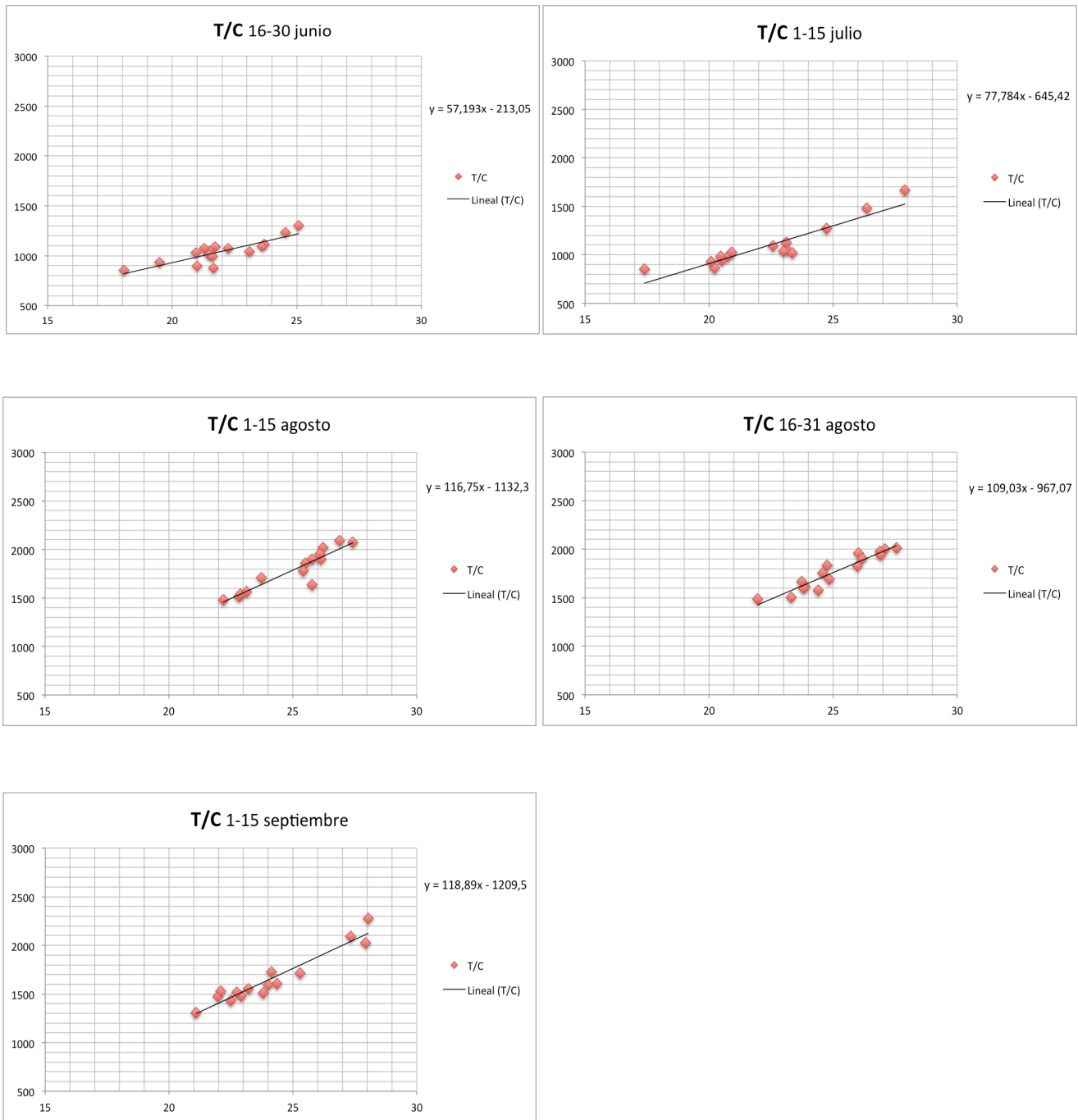


Fig. 31. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M2 por quincenas. Fuente: Elaboración propia.

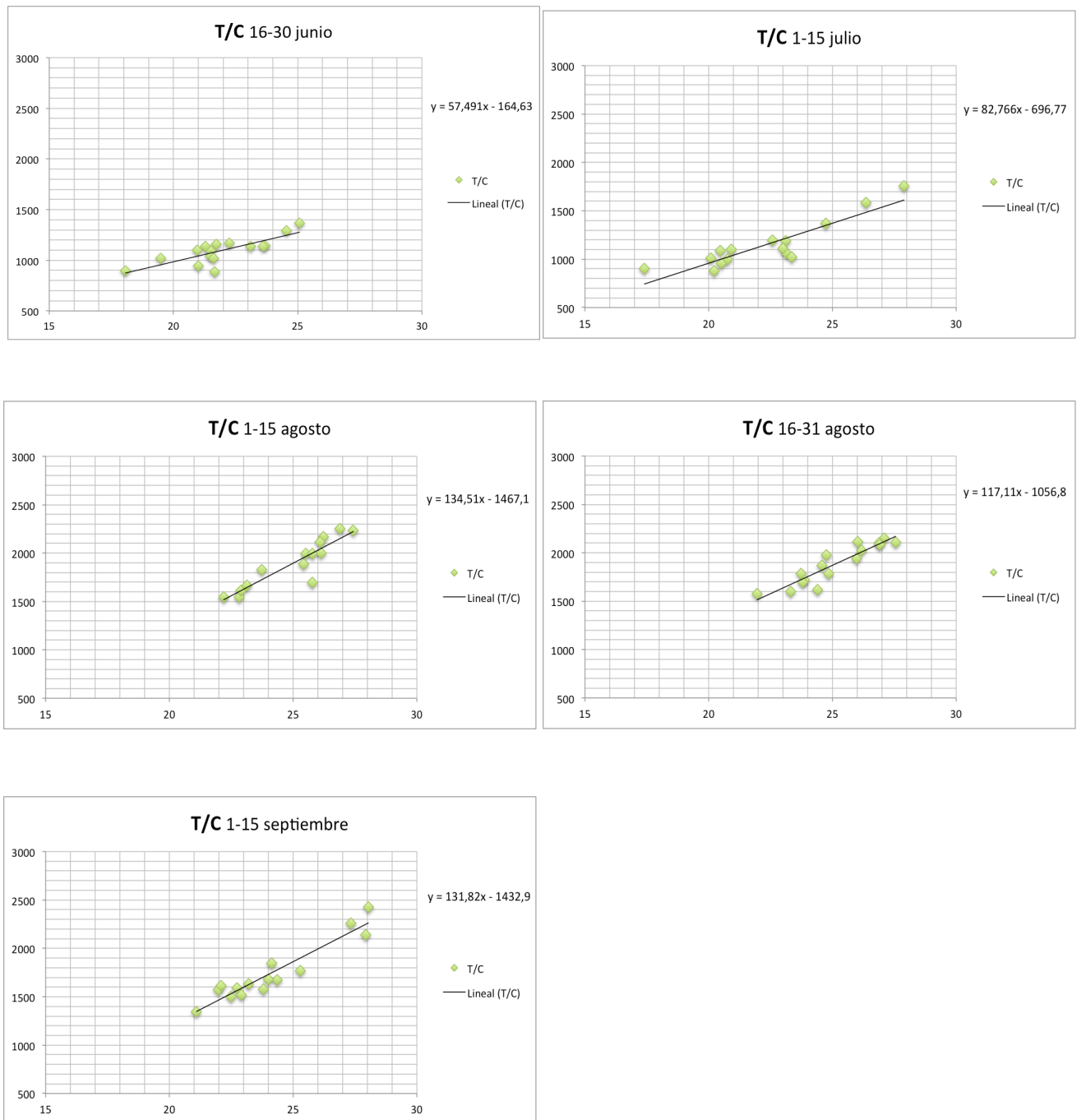


Fig. 32. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M3 por quincenas. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 33, 34 y 35 se expresan esas mismas relaciones por periodos mensuales o superiores para los módulos M1 (base), M2 (FV) y M3 (SATE), respectivamente. Igualmente en todos los casos se produce una regresión lineal con bastante ajuste, cuya ecuación se expresa en cada caso.

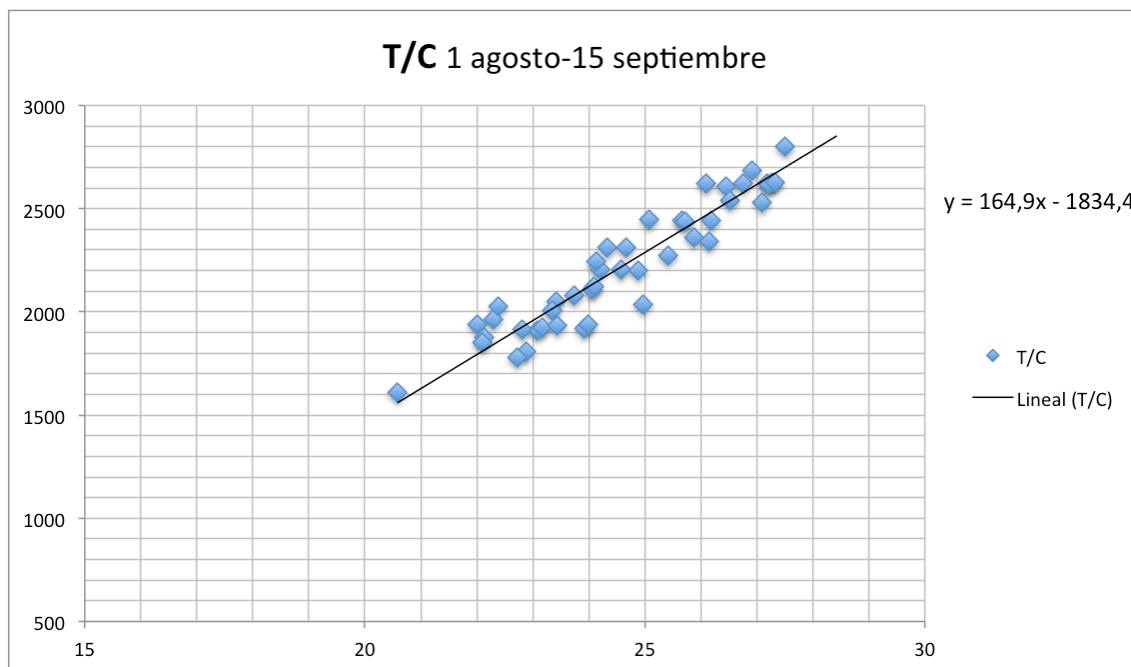
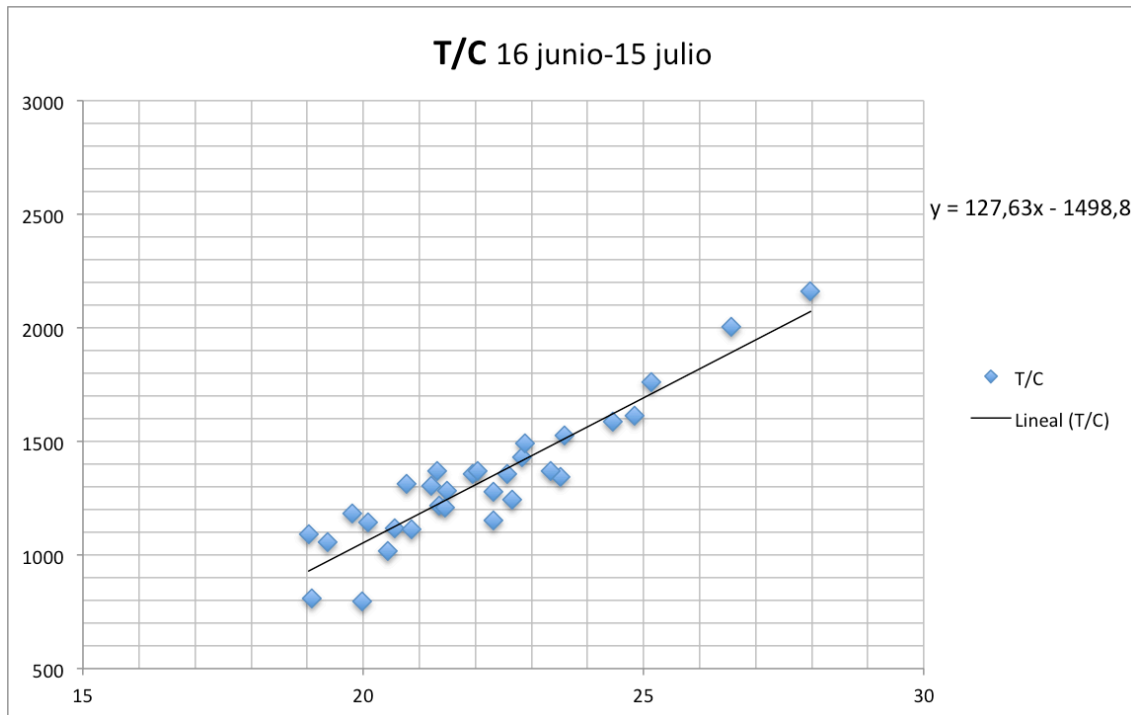


Fig. 33. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M1 por periodos mensuales.
Fuente: Elaboración propia.

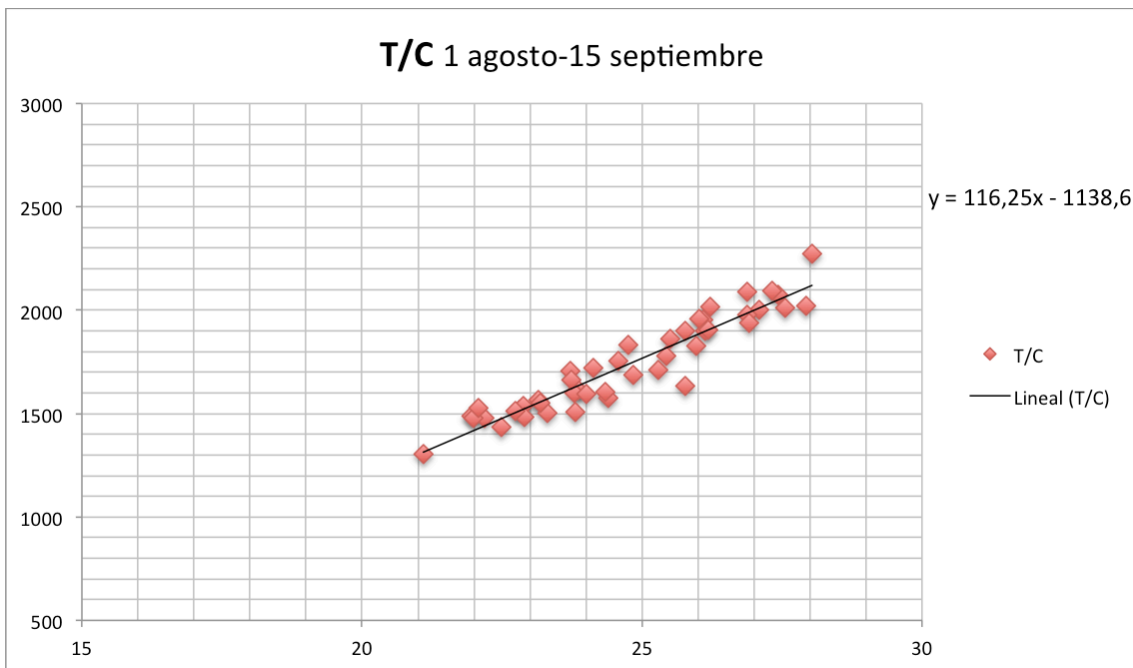
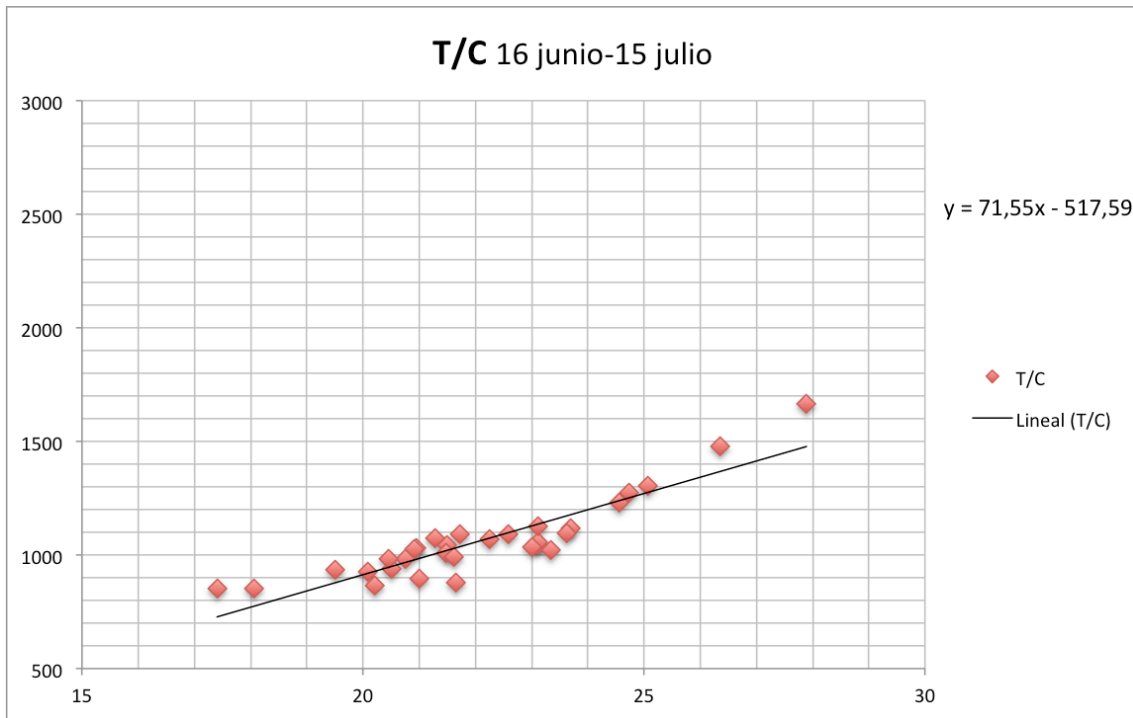


Fig. 34. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M2 por períodos mensuales.
Fuente: Elaboración propia.

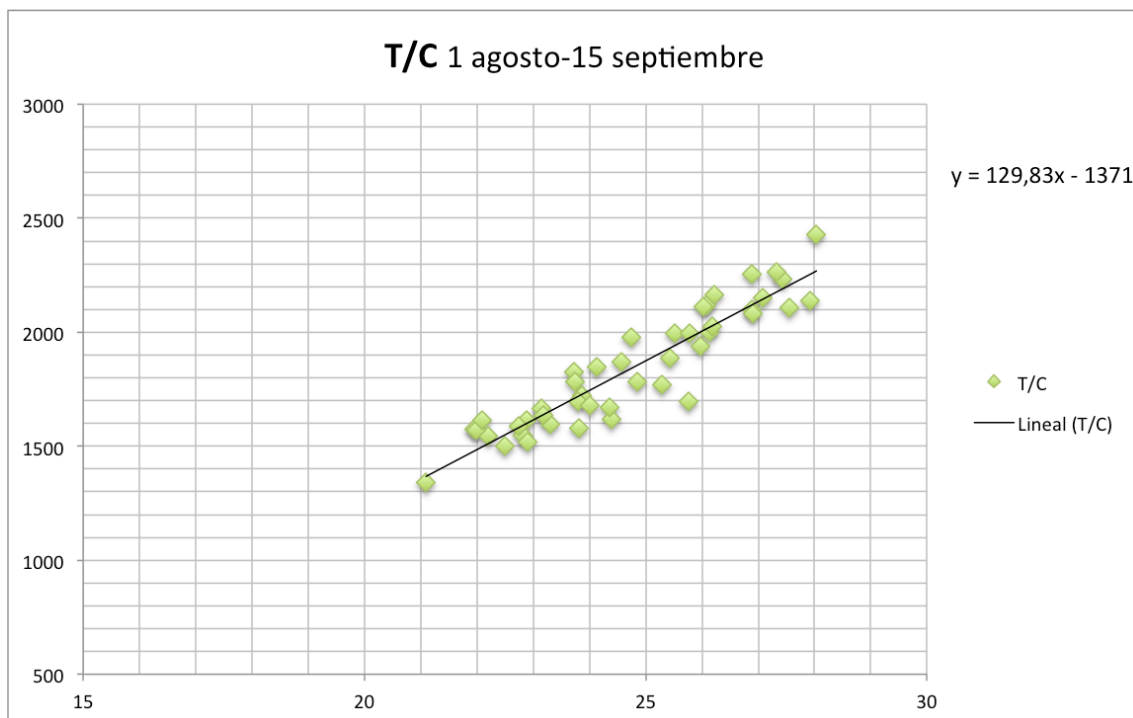
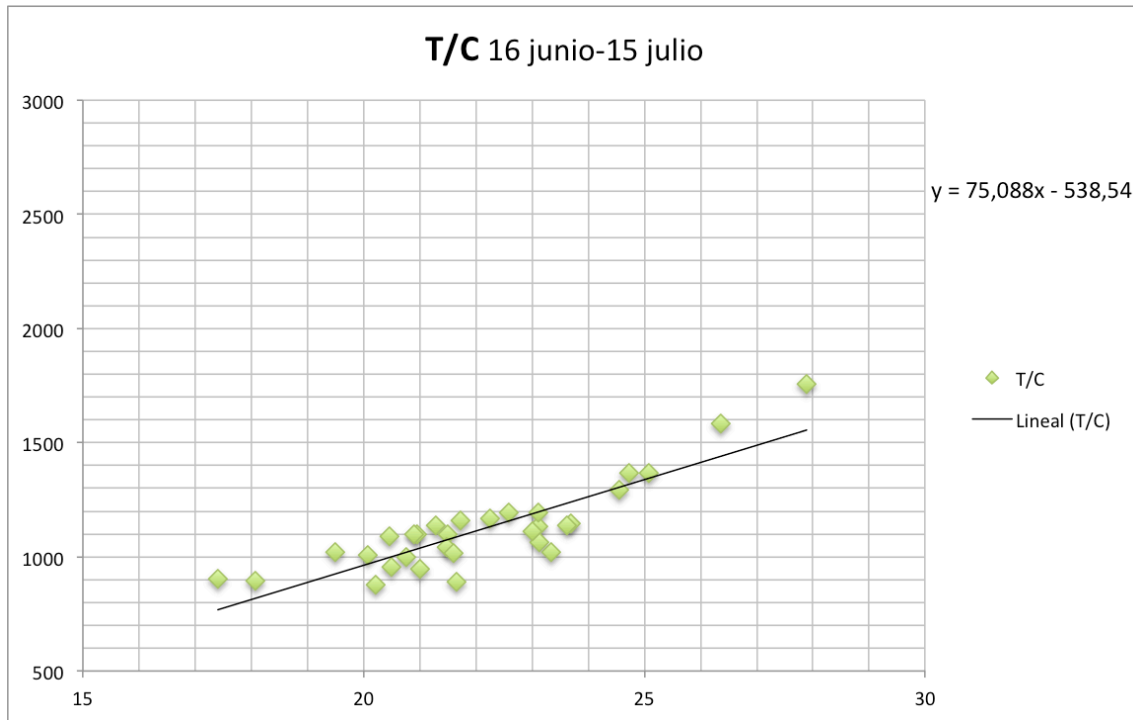


Fig. 35. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M3 por períodos mensuales.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, en las figuras 36, 37 y 38 se presentan esas mismas relaciones entre consumos diarios y temperaturas medias exteriores desfasadas en los módulos M1 (base), M2 (FV) y M3 (SATE) pero para todo el periodo estacional de verano.

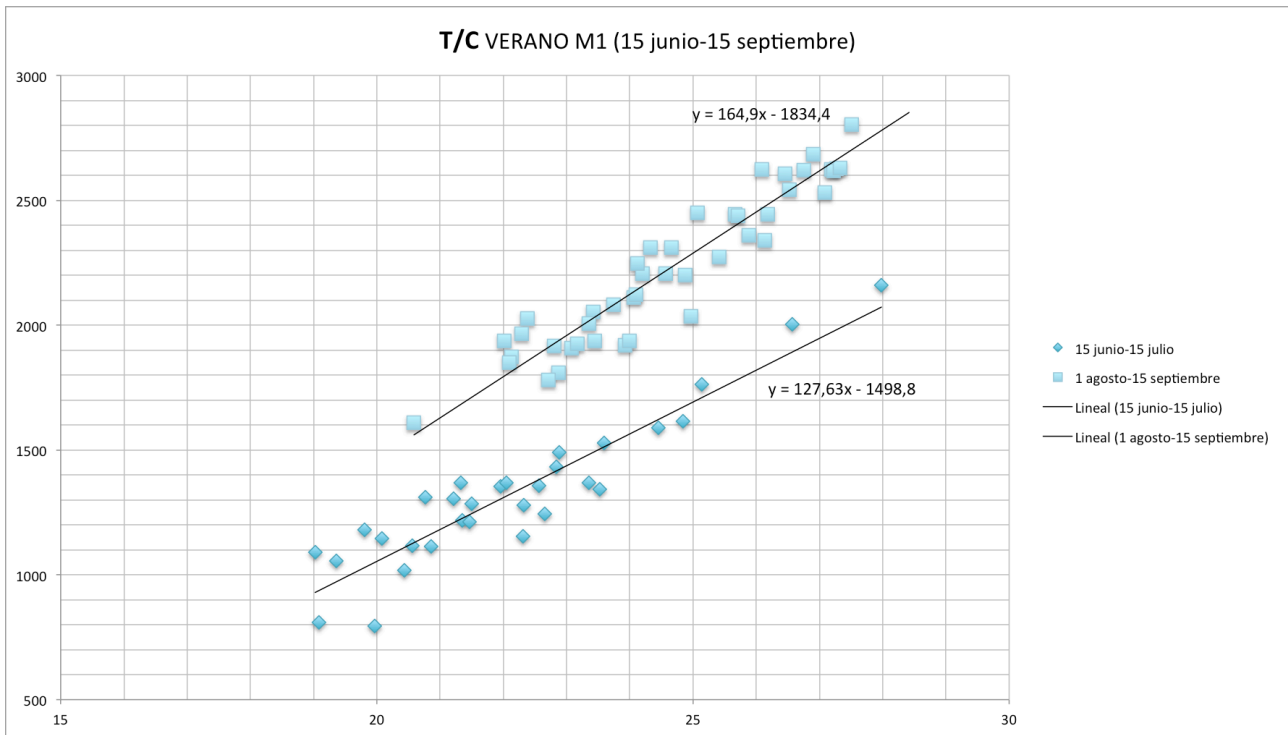


Fig. 36. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M1 en verano. Fuente: Elaboración propia.

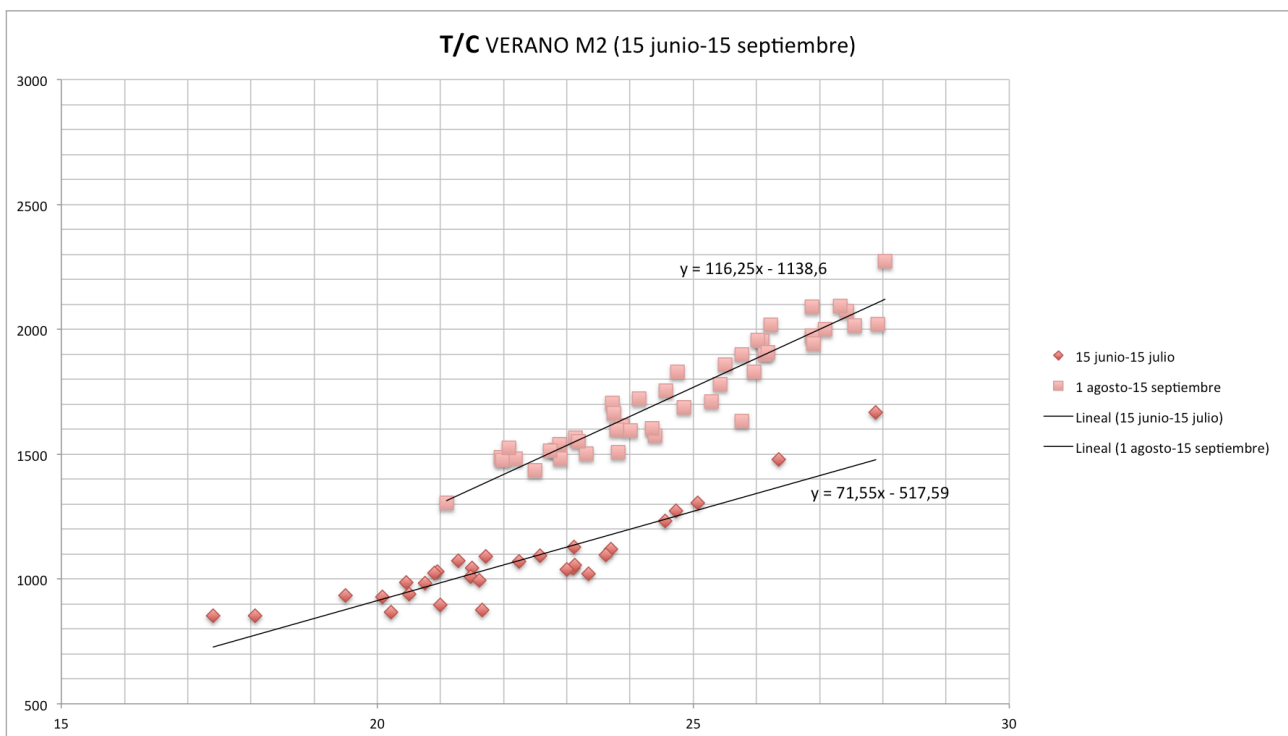


Fig 37. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M2 en verano. Fuente: Elaboración propia.

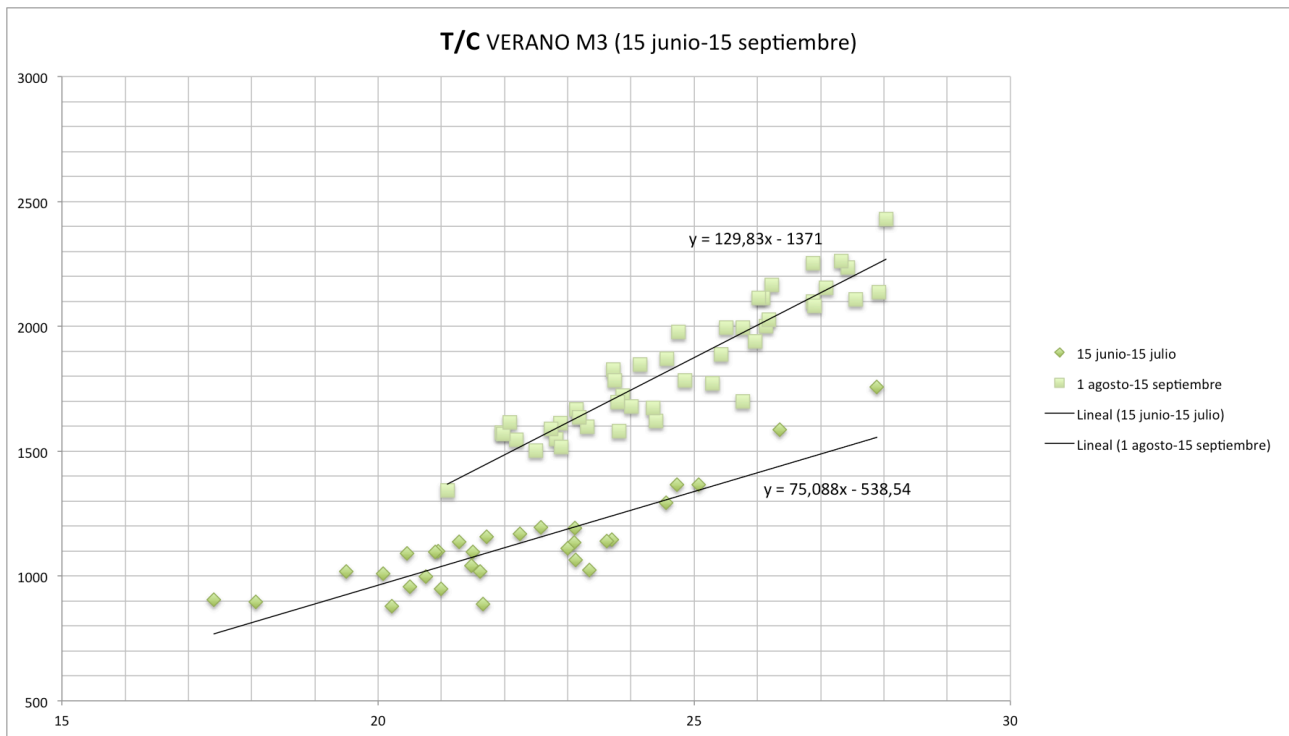


Fig. 38. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M3 en verano. Fuente: Elaboración propia.

B. Período de invierno.

Período Libre evolución: Desfase térmico. 13-27 enero.

Siguiendo el mismo método desarrollado para el período estacional de verano se obtendrán valores homólogos para la etapa de invierno.

Para poder calcular el desfase, se han seleccionado varios puntos del gráfico de temperaturas en el tiempo, coincidentes con los máximos de cada una de las cuatro ondas representadas (temperatura exterior y temperaturas interiores de M1, M2 y M3) para un día en concreto (Fig. 39). Se puede observar cómo el valor máximo de la temperatura exterior para un día cualquiera tendrá sus correlativos máximos para cada módulo varias horas después.

Si designamos por δ el desfase de la onda térmica, es decir, la diferencia en tiempo de cuando la temperatura exterior es máxima y cuando la temperatura interior es máxima:

Para el módulo base (M1) $\delta_1 = 6$ h

Para el módulo FV (M2) $\delta_2 = 8$ h

Para el módulo SATE (M3) $\delta_3 = 8$ h

Una vez calculados los desfases, para cada módulo asociamos su consumo en un instante determinado no a la temperatura exterior en ese mismo instante (eso sería si apenas tuviese inercia térmica la fachada), sino a la temperatura exterior que había δ horas antes. Posteriormente, podemos relacionar el consumo de la climatización de un módulo durante un día de ese periodo estacional con la temperatura exterior media no de ese mismo día, sino de un periodo anterior con desfase δ respecto del primero, también de duración 24 h.

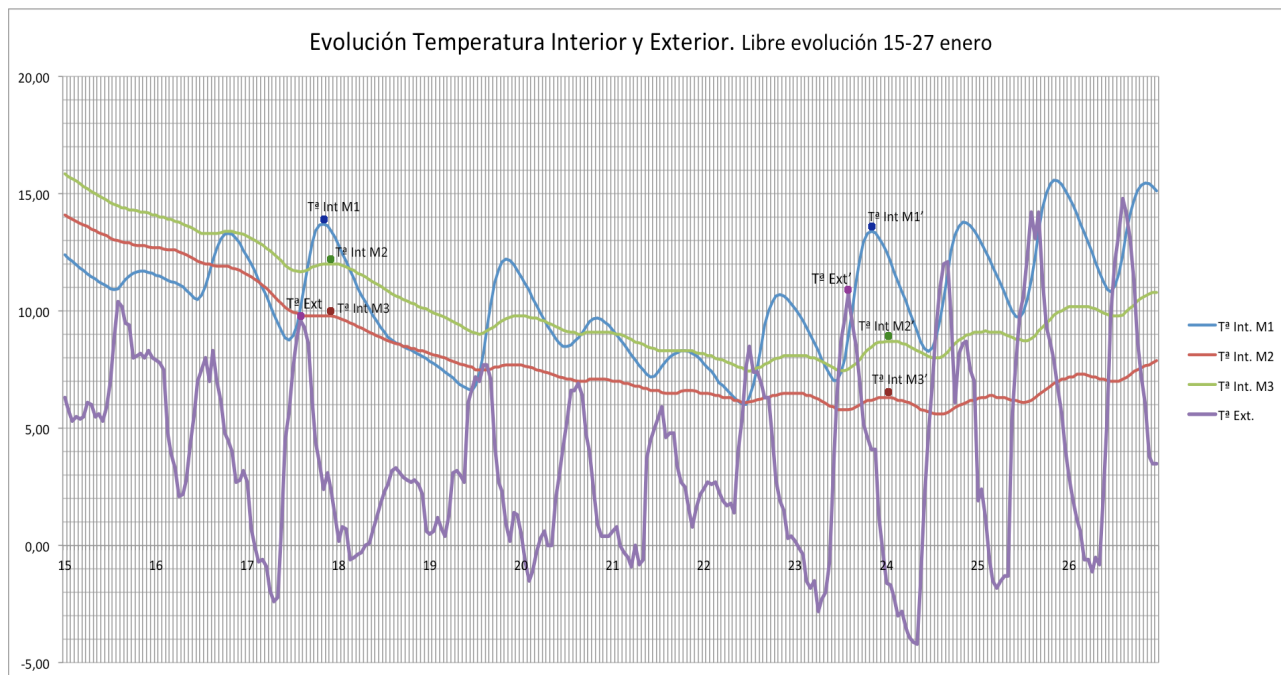


Fig. 39. Características de la monitorización del interior de los módulos M1, M2 y M3. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 40 se presentan para el M1 (base), por quincenas, las relaciones entre temperaturas medias exteriores desfasadas y consumos diarios de climatización en el periodo de invierno (por simplicidad la hemos estimado entre el 16 de diciembre y el 15 de marzo). No figura la quincena entre el 13 de julio y el 31 de enero, porque estuvo el módulo en libre evolución.

En las figuras 41 y 42 se presentan esas mismas relaciones para M2 (FV) y M3 (SATE), respectivamente.

Como se puede observar, en cada gráfica esa relación entre consumo de climatización y temperatura media exterior desfasada se ajusta bastante bien a una recta (regresión lineal) cuya ecuación también se recoge en cada caso.

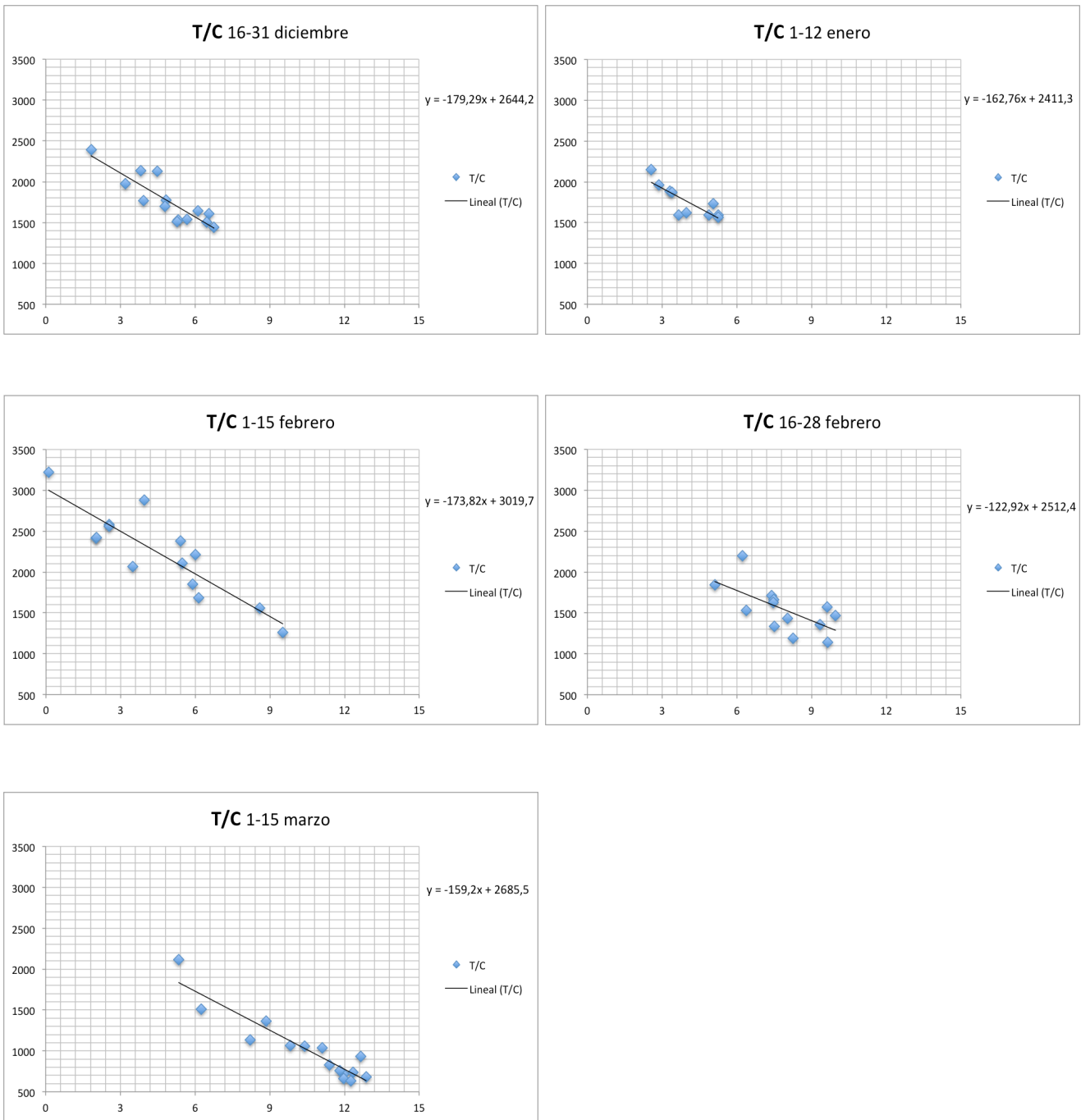


Fig. 40. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M1 por quincenas. Fuente: Elaboración propia.

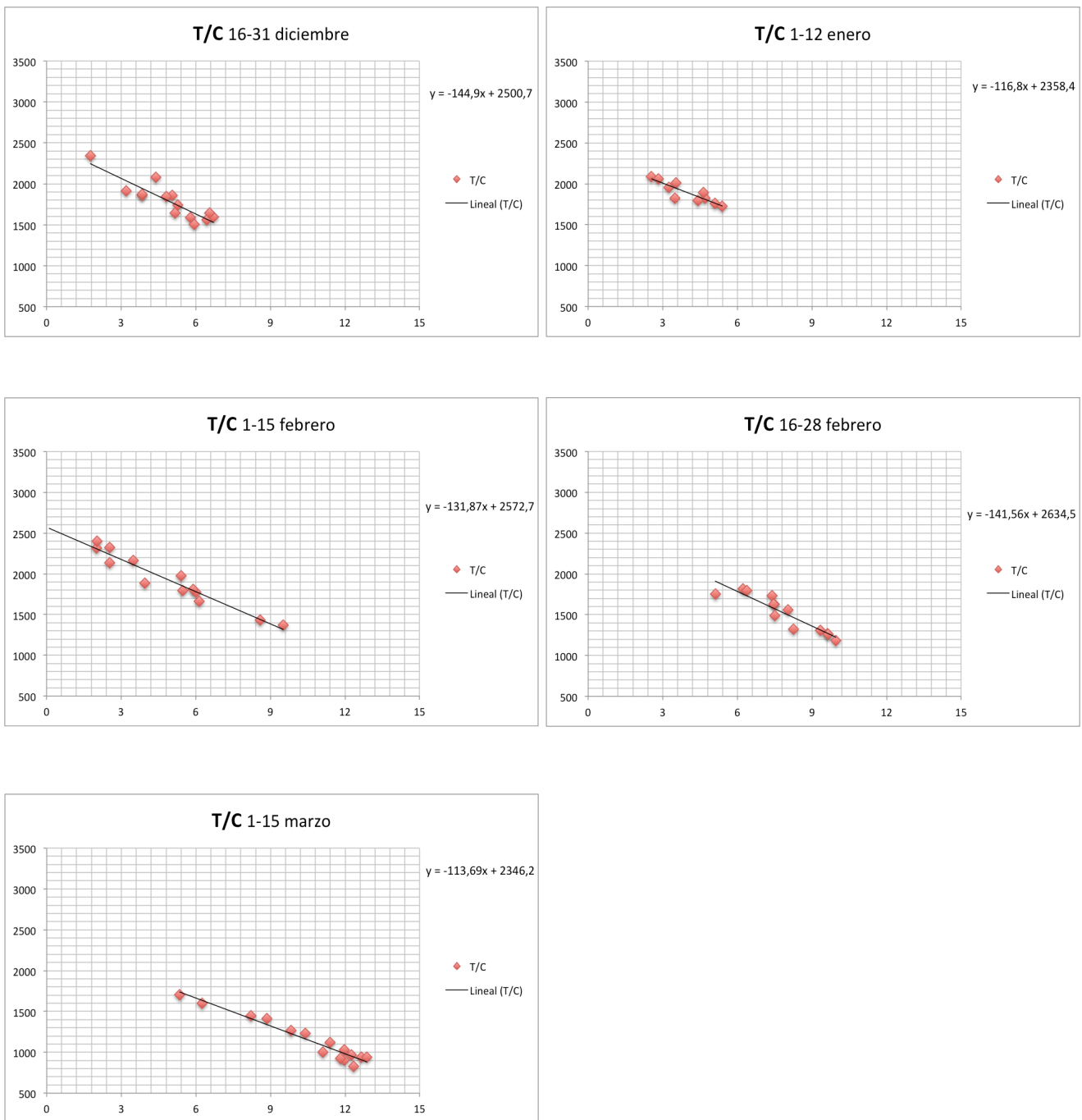


Fig. 41. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M2 por quincenas. Fuente: Elaboración propia.

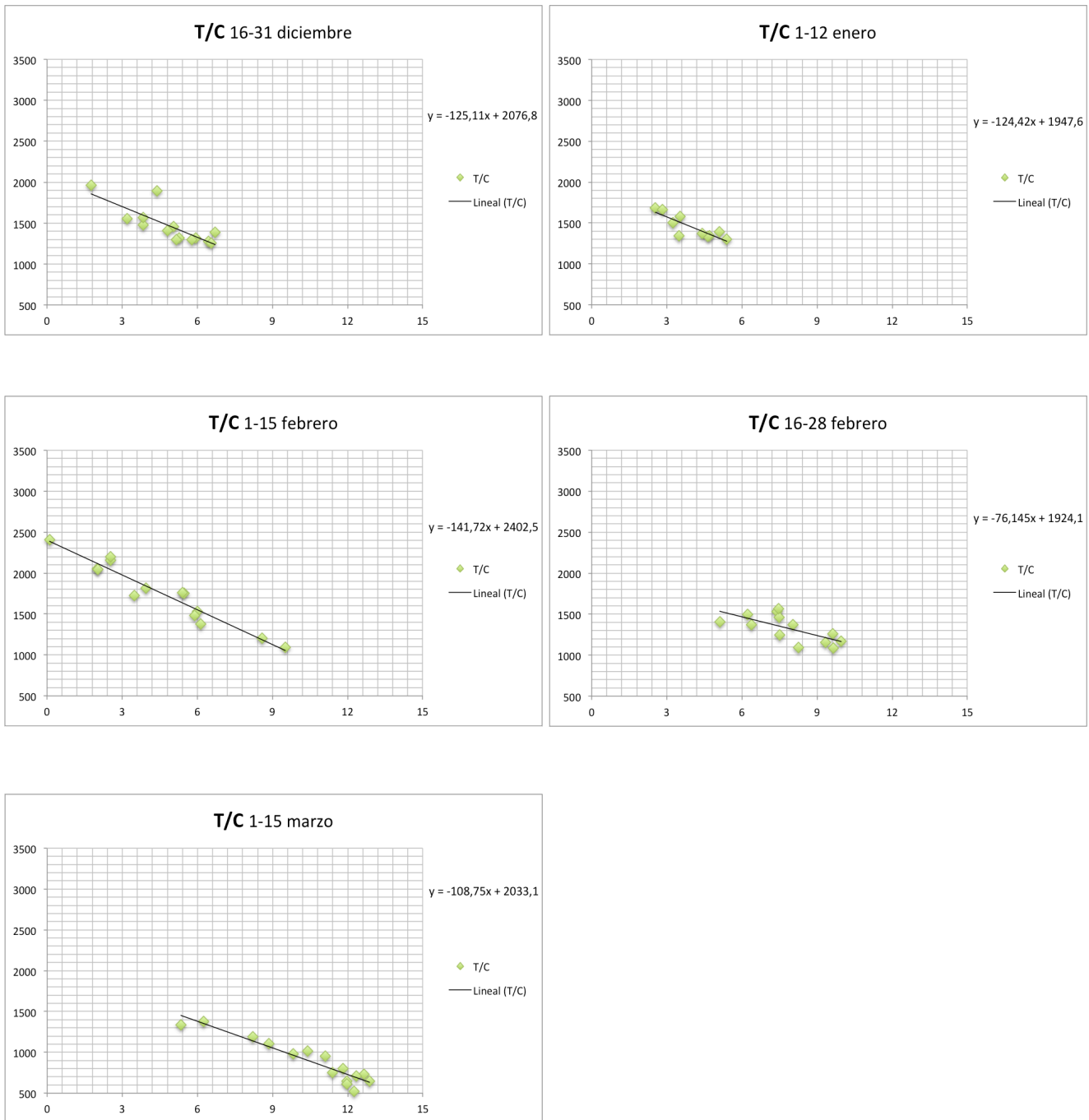


Fig. 42. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M3 por quincenas. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 43, 44 y 45 se expresan esas mismas relaciones por periodos mensuales o superiores para los módulos M1 (base), M2 (FV) y M3 (SATE), respectivamente. Igualmente en todos los casos se produce una regresión lineal con bastante ajuste, cuya ecuación se expresa en cada caso.

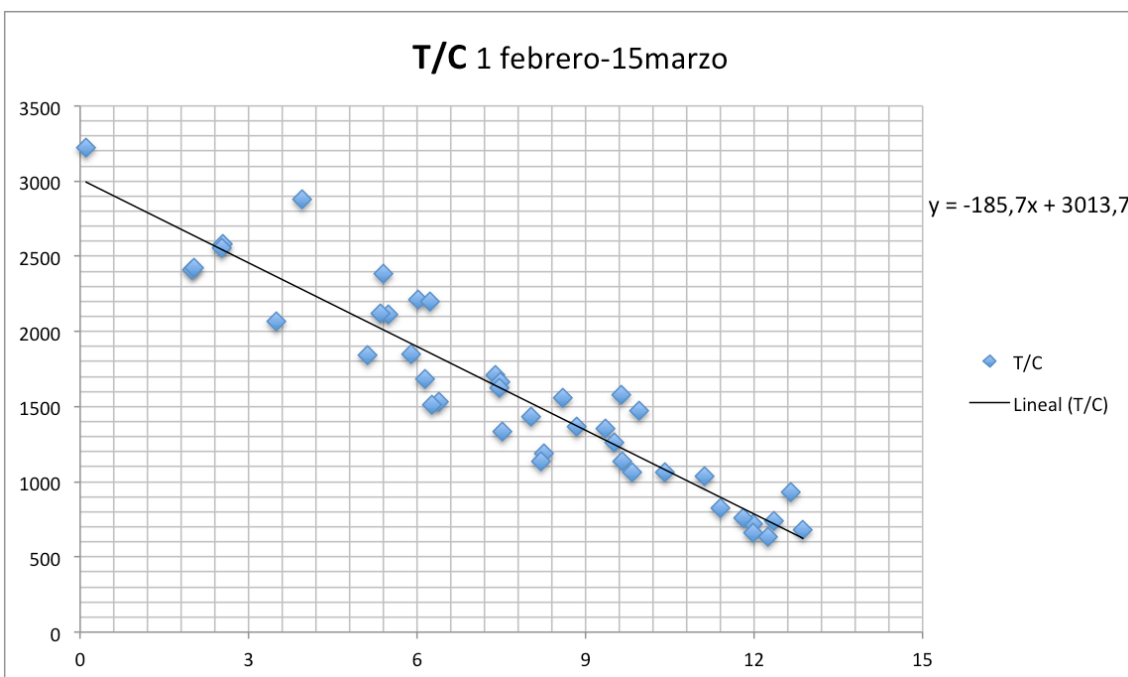
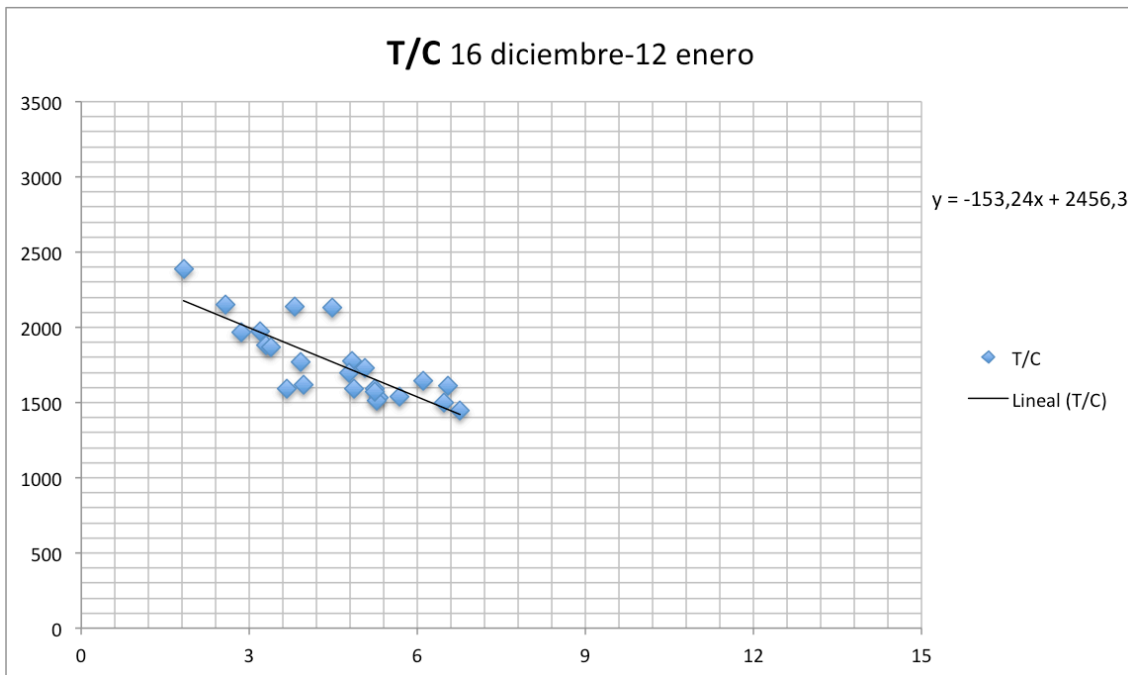


Fig. 43. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M1 por periodos mensuales.
Fuente: Elaboración propia.

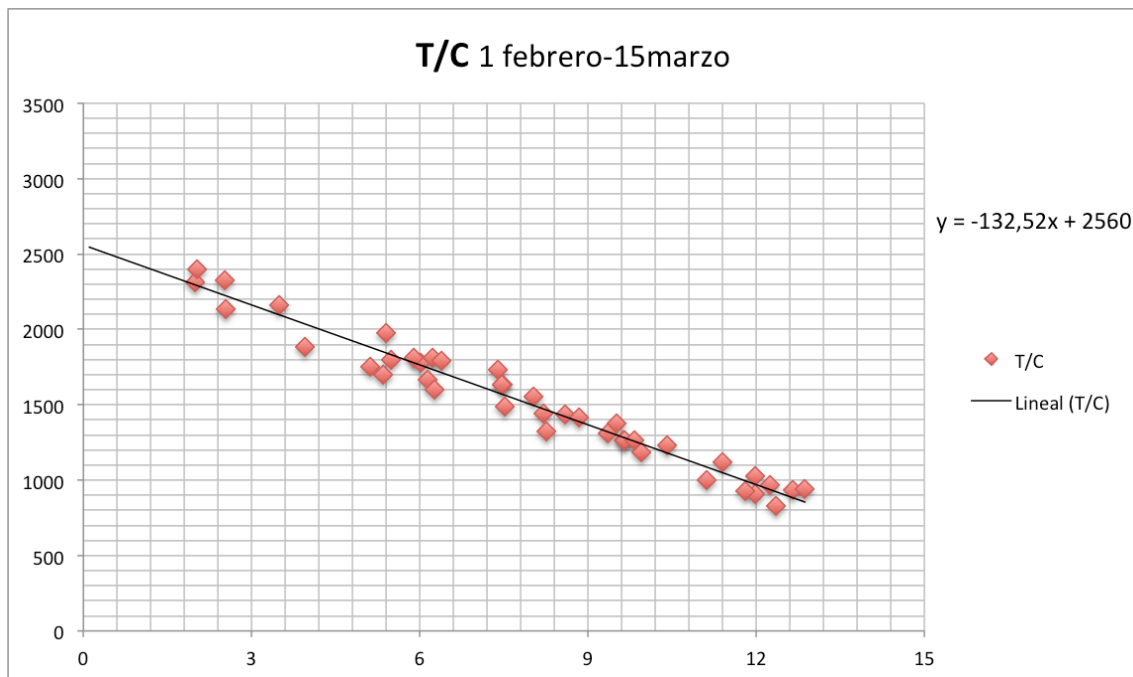
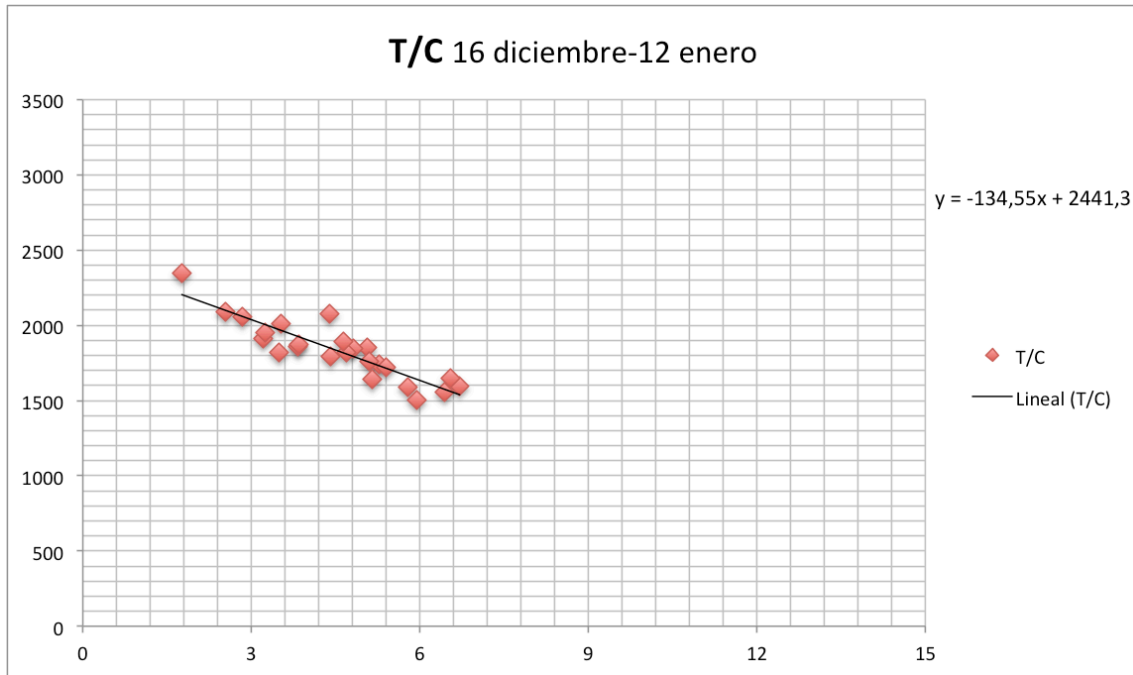


Fig. 44. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M2 por períodos mensuales.
Fuente: Elaboración propia.

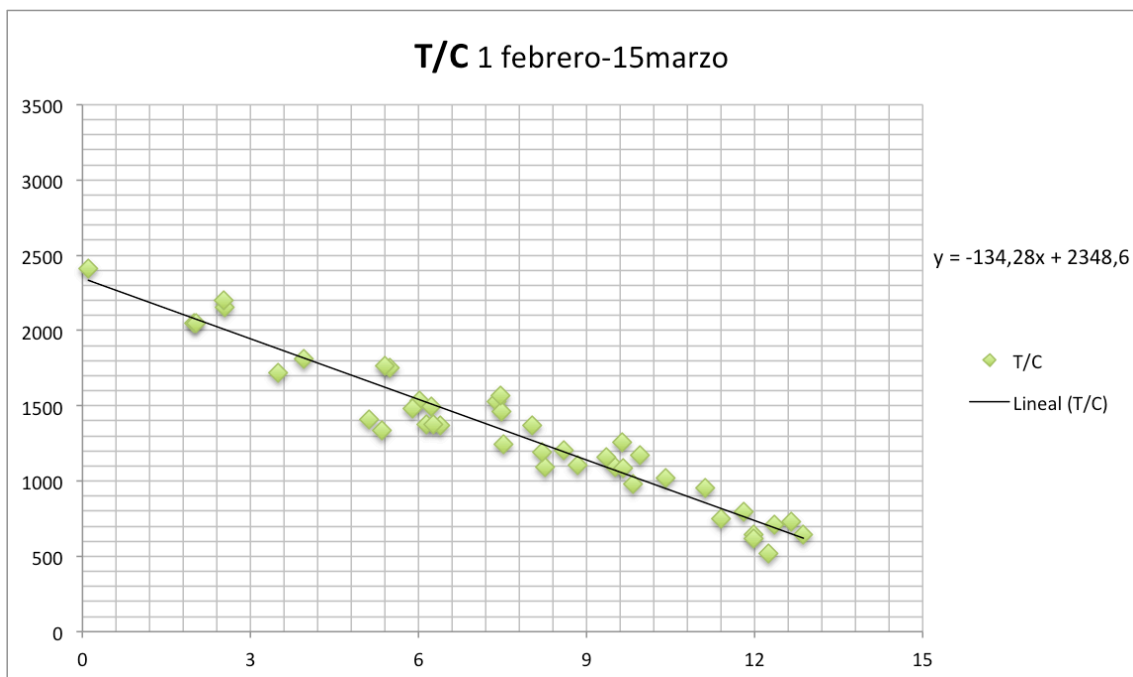
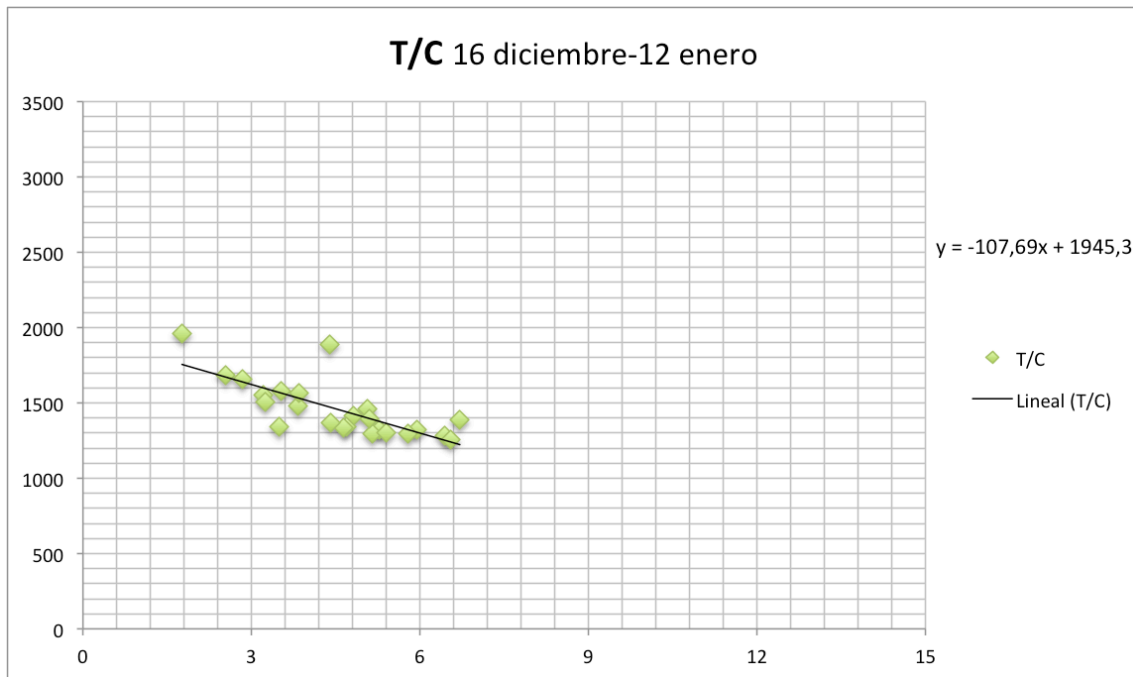


Fig. 45. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M3 por períodos mensuales.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, en las figuras 46, 47 y 48 se presentan esas mismas relaciones entre consumos diarios y temperaturas medias exteriores desfasadas en los módulos M1 (base), M2 (FV) y M3 (SATE), pero para todo el periodo estacional de invierno.

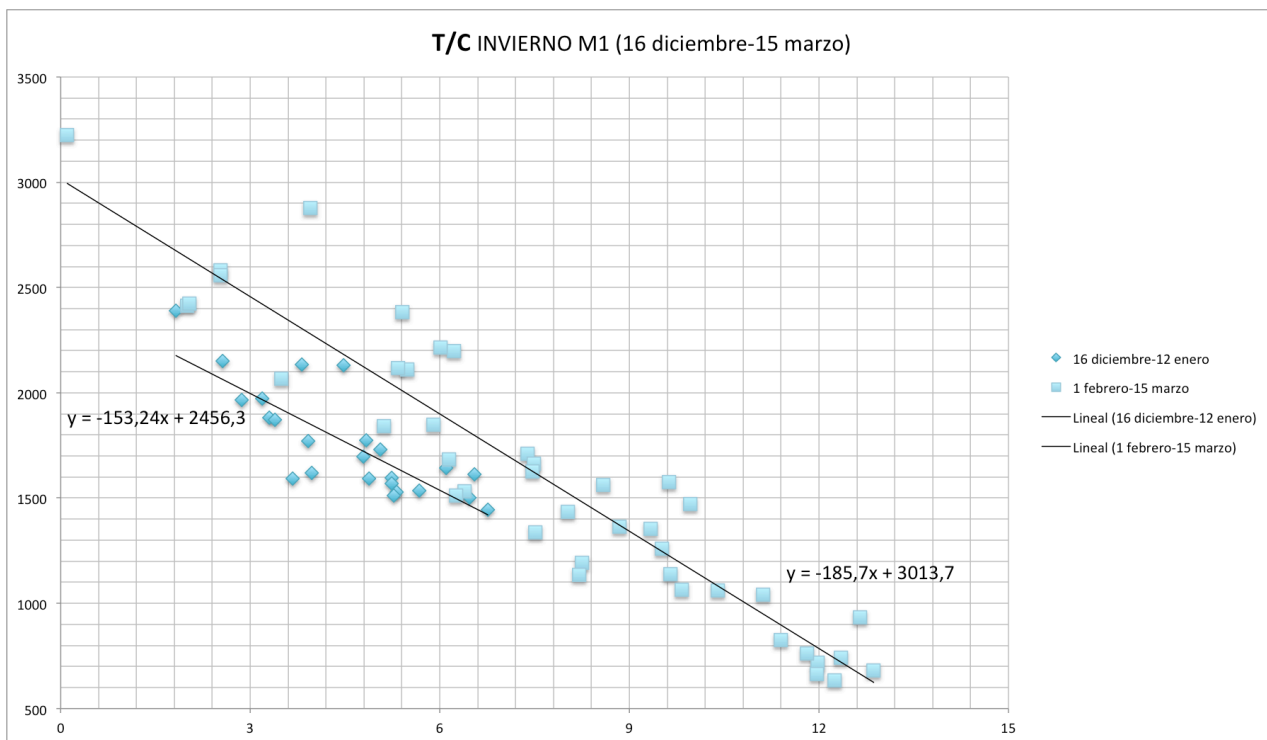


Fig. 46. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M1 en verano. Fuente: Elaboración propia.

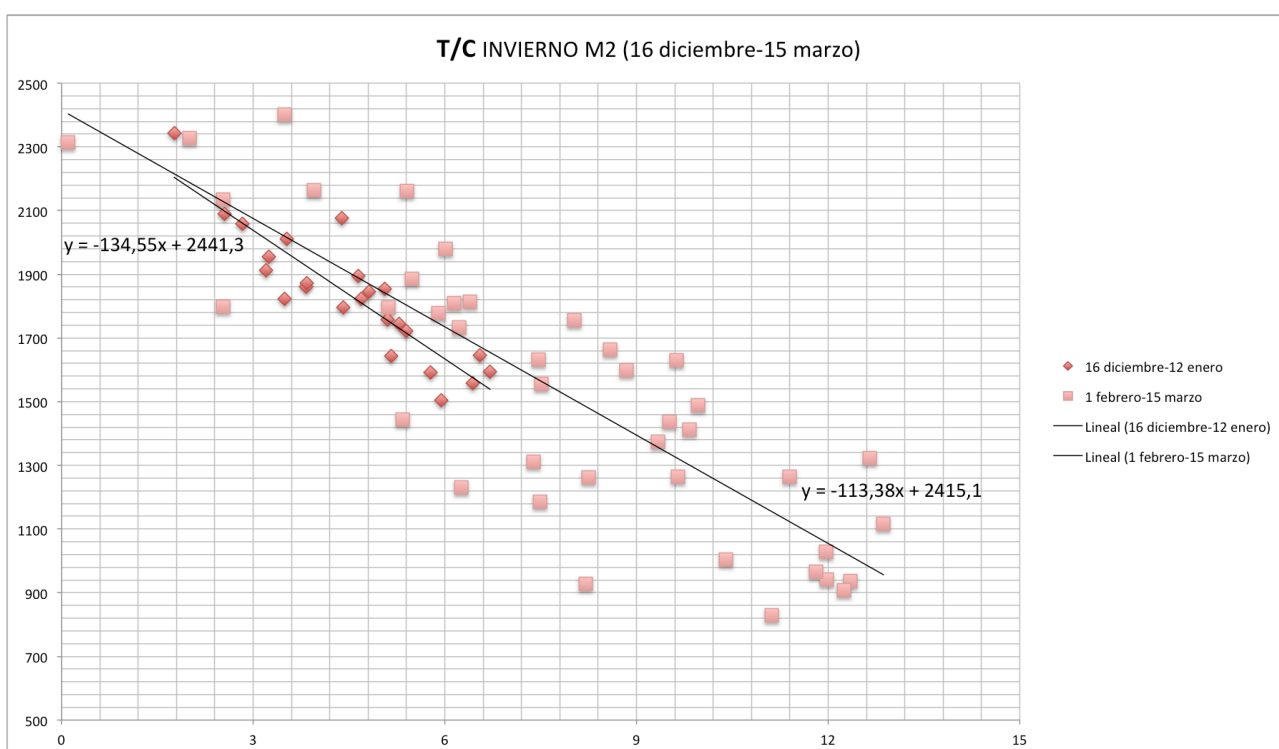


Fig. 47. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M2 en verano. Fuente: Elaboración propia.

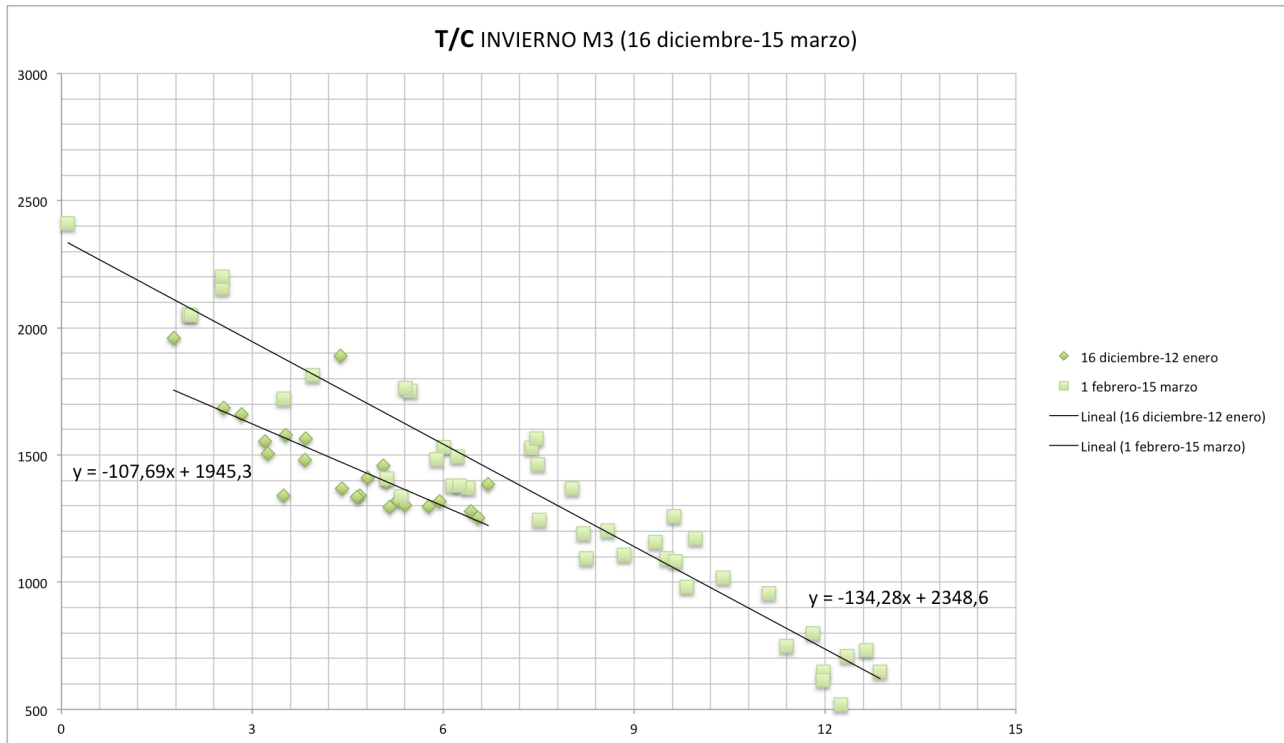


Fig. 48. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M3 en verano. Fuente: Elaboración propia.

4. Análisis de resultados.

VERANO

Tal y como se puede observar (Fig.49), en los tres módulos existe una clara diferencia de comportamiento entre la primera parte del verano (periodo 16 junio a 15 de julio) y segunda parte del verano (1 de agosto a 15 de septiembre). En este último periodo, a igualdad de temperatura media exterior, se produce un sensible mayor consumo derivado del efecto de acumulación de calor en la masa térmica a lo largo del verano y su dificultad de disipación dado que el módulo carece de sistema de ventilación. Además, el periodo que estuvieron los tres módulos en libre evolución, intermedio entre ambos periodos (15 de julio-30 de julio), no ha hecho sino resaltar aún más este efecto de acumulación, ya que los módulos no estuvieron en esa quincena climatizados. Las celdas de ensayos que se están construyendo en Sevilla sí disponen de sistema de ventilación, lo que permitirá valorar los efectos beneficiosos de la ventilación nocturnas en el periodo estival.

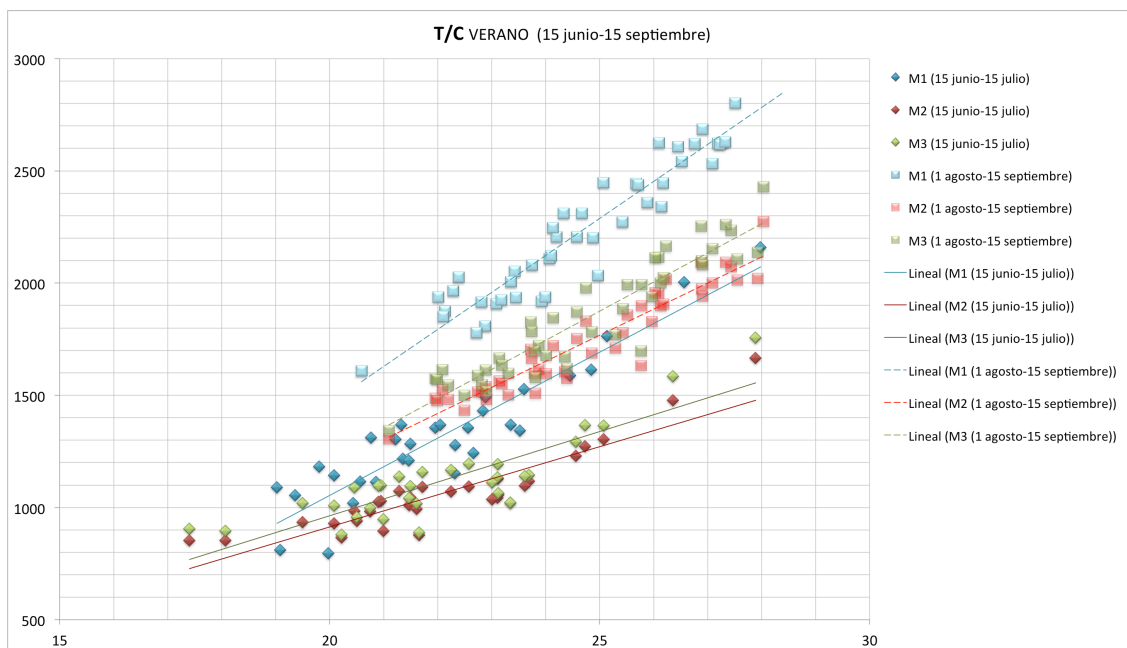


Fig. 49. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M1, M2 y M3 en verano.
 Fuente: Elaboración propia.

INVIERNO

Tal y como se puede observar (Fig.50), en los tres módulos existe una clara diferencia de comportamiento entre la primera parte del invierno (periodo 16 diciembre a 12 de enero) y segunda parte del invierno (1 de febrero a 15 de marzo). En este último periodo, a igualdad de temperatura media exterior, se produce un sensible mayor consumo como consecuencia de que ha perdido gran parte del calor acumulado en la masa térmica a lo largo del invierno, aunque este efecto se manifiesta en menor medida que en verano. Además, el periodo que estuvieron los tres módulos en libre evolución, intermedio entre ambos periodos (13 de enero-27 de enero), no ha hecho sino resaltar aún más este efecto de acumulación, ya que los módulos no estuvieron en esa quincena climatizados.

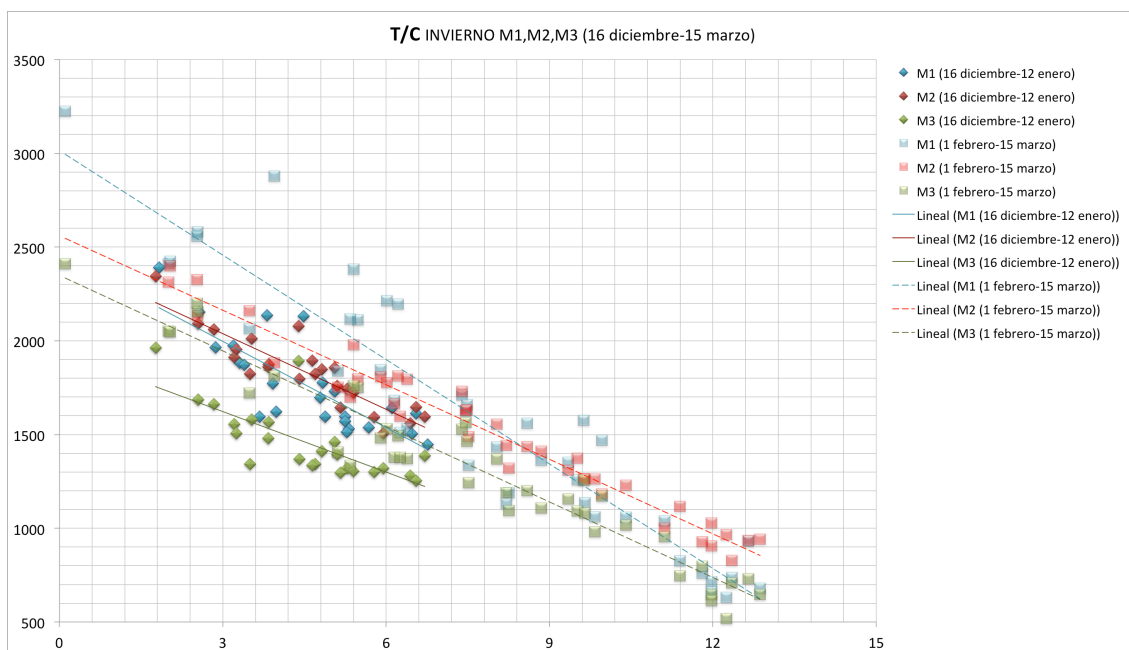


Fig. 50. Relación entre temperatura media exterior desfasada y consumo diario para M1, M2 y M3 en invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

En las ecuaciones de las rectas de regresión que relacionan el consumo diario con las temperaturas medias exteriores en un día (desfasadas), en los tres módulos, “y” representa ese consumo diario y “x” representa esa temperatura exterior media. Las pendientes de esas rectas “m” nos ofrecen información de cómo evolucionan esos consumos en relación a esas temperaturas: cuanto mayor es la pendiente de la recta menos eficiente será la solución de fachada del módulo y viceversa.

Analicemos los resultados obtenidos en ambos periodos, verano e invierno, desglosados cada uno de ellos en sus dos subperiodos temporales: en verano del 16 de junio al 15 de agosto, por un lado, y del 1 de agosto al 15 de septiembre; y en invierno del 16 de diciembre al 15 de enero, por un lado y del 1 de febrero al 15 de marzo, por otro. Esos resultados se exponen en la tabla II para cada uno de los módulos, periodo y subperiodos estacionales que a continuación vamos a detallar:

	Periodo	Tmedia (°C)	M1(Wh)	M2(Wh)	M3(Wh)	M2/M1	M3/M1	M3/M2
Verano	16 junio-15 julio	20	1053,8	913,41	963,22	0,867	0,914	1,055
		25	1691,95	1271,16	1338,66	0,751	0,791	1,053
	1 agosto- 15 sept.	20	1463,6	1186,4	1225,6	0,811	0,837	1,033
		25	2288,1	1767,65	1874,75	0,773	0,819	1,061
Invierno	16 dic - 12 enero	2	2149,82	2172,2	1729,92	1,010	0,805	0,796
		7	1383,62	1499,45	1191,47	1,084	0,861	0,795
		10	1156,7	1234,8	1005,8	1,068	0,870	0,906
	1 febrero- 15 mar	2	2642,3	2294,96	2080,04	0,869	0,787	0,815
		7	1713,8	1632,36	1408,64	0,952	0,822	0,863
		10	1156,7	1234,8	1005,8	1,068	0,870	0,906

Tabla II. Resultados obtenidos a partir de las ecuaciones de las rectas de regresión. Fuente: Elaboración propia.

Verano (16 de junio-15 de julio)

a) Valoración de M2 (FV) respecto de M1 (base)

La ecuación de la recta en M1 es: $y_1 = 127,63 x - 1498,8$

La ecuación de la recta en M2 es: $y_2 = 71,55 x - 517,59$

Para una temperatura media exterior en un día de 20 °C ($x = 20$ °C):

M1 → $y_1 = 1053,8$ Wh

M2 → $y_2 = 913,4$ Wh

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 0,87$

Para una temperatura media exterior en un día de 25°C ($x = 25$ °C):

M1 → $y_1 = 1692$ Wh

M2 → $y_2 = 1271,1$ Wh

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 0,75$

Cómo puede observarse, la mejora de la eficiencia energética de la fachada ventilada respecto el módulo base crece con la temperatura entre un 13-25%.

b) Valoración de M3 (SATE) respecto de M1 (base)

La ecuación de la recta en M1 es: $y_1 = 127,63 x - 1498,8$

La ecuación de la recta en M3 es: $y_3 = 75,088 x - 538,54$

Para una temperatura media exterior en un día de **20 °C** ($x = 20$ °C):

$$M1 \rightarrow y1 = 1053,8 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 963,2 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,91$

Para una temperatura media exterior en un día de **25°C** ($x = 25$ °C):

$$M1 \rightarrow y1 = 1692 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1338,7 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,79$

Igualmente, la mejora de la eficiencia energética del sistema SATE respecto el módulo base crece con la temperatura entre un 10-20%.

c) Valoración de M3 (SATE) respecto de M2 (FV)

La ecuación de la recta en M2 es: $y2 = 71,55 x - 517,59$

La ecuación de la recta en M3 es: $y3 = 75,088 x - 538,54$

Para una temperatura media exterior en un día de **20 °C** ($x = 20$ °C):

$$M2 \rightarrow y2 = 913,4 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 963,2 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 1,05$

Para una temperatura media exterior en un día de **25°C** ($x = 25$ °C):

$$M2 \rightarrow y2 = 1271,1 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1338,7 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 1,05$

Cómo puede observarse, la eficiencia energética de una solución respecto de otra es casi independiente de la temperatura, siendo un 5% más eficiente la solución FV que la SATE.

Verano (1 de agosto-15 de septiembre)

a) Valoración de M2 (FV) respecto de M1 (base)

La ecuación de la recta en M1 es: $y1 = 164,9 x - 1834,4$

La ecuación de la recta en M2 es: $y2 = 116,25 x - 1138,6$

Para una temperatura media exterior en un día de **20 °C** ($x = 20$ °C):

$$M1 \rightarrow y1 = 1463,6 \text{ Wh}$$

$$M2 \rightarrow y2 = 1186,4 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 0,81$

Para una temperatura media exterior en un día de **25°C** ($x = 25^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 2288,1 \text{ Wh}$$

$$M2 \rightarrow y2 = 1767,65 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 0,77$

Para una temperatura media exterior en un día de **28°C** ($x = 28^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 2782,8 \text{ Wh}$$

$$M2 \rightarrow y2 = 2116,4 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 0,76$

Cómo puede observarse, la mejora de la eficiencia energética de la fachada ventilada respecto el módulo base crece con la temperatura entre un 20-25%.

b) Valoración de M3 (SATE) respecto de M1 (base)

La ecuación de la recta en M1 es: $y1 = 164,9 x - 1834,4$

La ecuación de la recta en M3 es: $y3 = 129,83 x - 1371$

Para una temperatura media exterior en un día de **20 °C** ($x = 20^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 1463,6 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1225,6 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,83$

Para una temperatura media exterior en un día de **25°C** ($x = 25^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 2288,1 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1874,75 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,81$

Para una temperatura media exterior en un día de **28°C** ($x = 28^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 2782,8 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 2264,24 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,81$

Igualmente, la mejora de la eficiencia energética del sistema SATE respecto el módulo base crece ligeramente con la temperatura entre un 18-20%.

c) Valoración de M3 (SATE) respecto de M2 (FV)

La ecuación de la recta en M2 es: $y2 = 116,25 x - 1138,6$

La ecuación de la recta en M3 es: $y3 = 129,83 x - 1371$

Para una temperatura media exterior en un día de **20 °C** ($x = 20^{\circ}\text{C}$):

$$M2 \rightarrow y2 = 1186,4 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1225,6 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 1,03$

Para una temperatura media exterior en un día de **25°C** ($x = 25^{\circ}\text{C}$):

$$M2 \rightarrow y_2 = 1767,65 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y_3 = 1874,75 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 1,06$

Para una temperatura media exterior en un día de **28°C** ($x = 28^{\circ}\text{C}$):

$$M2 \rightarrow y_2 = 2116,4 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y_3 = 2264,24 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 1,07$

Cómo puede observarse, la eficiencia energética de una solución respecto de otra es casi independiente de la temperatura, siendo entre un 3-7% más eficiente la solución FV que la SATE.

Invierno (16 de diciembre-12 enero)

a) Valoración de M2 (FV) respecto de M1 (base)

La ecuación de la recta en M1 es: $y_1 = -153,24 x + 2456,3$

La ecuación de la recta en M2 es: $y_2 = -134,55 x + 2441,3$

Para una temperatura media exterior en un día de **2°C** ($x = 2^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y_1 = 2149,82 \text{ Wh}$$

$$M2 \rightarrow y_2 = 2172,2 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 1,01$

Para una temperatura media exterior en un día de **7°C** ($x = 7^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y_1 = 1383,62 \text{ Wh}$$

$$M2 \rightarrow y_2 = 1499,45 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 1,08$

Cómo puede observarse, la mejora de la eficiencia energética crece con la temperatura. En invierno, tanto la fachada ventilada como la tradicional funcionan de una manera muy similar, siendo la fachada tradicional entre un 1-8% más eficiente que la fachada ventilada.

b) Valoración de M3 (SATE) respecto de M1 (base)

La ecuación de la recta en M1 es: $y_1 = -153,24 x + 2456,3$

La ecuación de la recta en M3 es: $y_3 = -107,69 x + 1945,3$

Para una temperatura media exterior en un día de **2°C** ($x = 2^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y_1 = 2149,82 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y_3 = 1729,92 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,80$

Para una temperatura media exterior en un día de 7°C ($x = 7^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 1383,62 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1191,47 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,86$

Al contrario que ocurre con M2, para M3 la mejora de la eficiencia energética crece a medida que disminuye la temperatura entre un 14-20%.

c) Valoración de M3 (SATE) respecto de M2 (FV)

La ecuación de la recta en M2 es: $y2 = -134,55 x + 2441,3$

La ecuación de la recta en M3 es: $y3 = -107,69 x + 1945,3$

Para una temperatura media exterior en un día de 2°C ($x = 2^{\circ}\text{C}$):

$$M2 \rightarrow y2 = 2172,2 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1729,92 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 0,80$

Para una temperatura media exterior en un día de 7°C ($x = 7^{\circ}\text{C}$):

$$M2 \rightarrow y2 = 1499,45 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1191,47 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 0,79$

Cómo puede observarse, la eficiencia energética de una solución respecto de otra es casi independiente de la temperatura, siendo un 20% más eficiente la solución SATE que la FV.

Invierno (1 de febrero – 15 de marzo)

a) Valoración de M2 (FV) respecto de M1 (base)

La ecuación de la recta en M1 es: $y1 = -185,7 x + 3013,7$

La ecuación de la recta en M2 es: $y2 = -132,52 x + 2560$

Para una temperatura media exterior en un día de 2°C ($x = 2^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 2642,3 \text{ Wh}$$

$$M2 \rightarrow y2 = 2294,96 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 0,86$

Para una temperatura media exterior en un día de 7°C ($x = 7^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 1713,8 \text{ Wh}$$

$$M2 \rightarrow y2 = 1632,36 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 0,95$

Para una temperatura media exterior en un día de 10°C ($x = 10^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 1156,7 \text{ Wh}$$

$$M2 \rightarrow y2 = 1234,8 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M2/M1 = 1,06$

Cómo puede observarse, con temperaturas menores M2 obtiene mejor eficiencia energética, entre un 5-15%. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura la fachada tradicional funciona mejor que la ventilada, en torno a un 6% de eficiencia energética.

b) Valoración de M3 (SATE) respecto de M1 (base)

$$\text{La ecuación de la recta en M1 es: } y1 = -185,7 x + 3013,7$$

$$\text{La ecuación de la recta en M3 es: } y3 = -134,28 x + 2348,6$$

Para una temperatura media exterior en un día de 2°C ($x = 2^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 2642,3 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 2080,04 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,78$

Para una temperatura media exterior en un día de 7°C ($x = 7^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 1713,8 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1408,64 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,82$

Para una temperatura media exterior en un día de 10°C ($x = 10^{\circ}\text{C}$):

$$M1 \rightarrow y1 = 1156,7 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1005,8 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M1 = 0,86$

La mejora de la eficiencia energética crece a medida que disminuye la temperatura. El sistema SATE se comporta mejor que la fachada ventilada, con una eficiencia energética de entre 14-22%.

c) Valoración de M3 (SATE) respecto de M2 (FV)

$$\text{La ecuación de la recta en M2 es: } y2 = -132,52 x + 2560$$

$$\text{La ecuación de la recta en M3 es: } y3 = -134,28 x + 2348,6$$

Para una temperatura media exterior en un día de 2°C ($x = 2^{\circ}\text{C}$):

$$M2 \rightarrow y2 = 2294,96 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 2080,04 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 0,81$

Para una temperatura media exterior en un día de 7°C ($x = 7^{\circ}\text{C}$):

$$M2 \rightarrow y2 = 1632,36 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1408,64 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 0,86$

Para una temperatura media exterior en un día de 10°C ($x = 10^{\circ}\text{C}$):

$$M2 \rightarrow y2 = 1234,8 \text{ Wh}$$

$$M3 \rightarrow y3 = 1005,8 \text{ Wh}$$

Relación entre consumos diarios: $M3/M2 = 0,90$

Cómo puede observarse, la solución constructiva desarrollada con SATE es entre un 10-20% más eficiente que la fachada ventilada. Esta eficiencia crece a medida que disminuye la temperatura.

Otra de las ventajas que se puede obtener a partir de las gráficas realizadas en este trabajo fin de grado es la posibilidad de aplicar los modelos predictivos, según el periodo estacional, para hacer un pronóstico de consumos eléctricos derivados de la climatización en los tres módulos, conocidas las temperaturas medias exteriores. Este objetivo se ejemplificará a partir del periodo de libre evolución de enero (13-27 enero), periodo en el que los módulos no estuvieron climatizados y, por tanto, desconocemos cuáles serían esos consumos diarios.

Las temperaturas exteriores para este periodo de libre evolución son semejantes al primer periodo (16 diciembre-12 enero), de manera que se utilizará el modelo predictivo (recta de regresión) de dicho periodo. A partir de la ecuación de la recta $y = m \cdot x + b$, se pueden obtener los valores de esos consumos diarios (Tabla III). Sustituyendo el valor de "x" en la ecuación por la temperatura exterior media desfasada del periodo de libre evolución, obtenemos el valor de "y" que representa el consumo medio diario.

Estación	Período	Temp Ext. Media	Temp.Ext.Media Desf. 6h M1	Consumo M1	Temp.Ext.Media Desf. 8h M2	Consumo M2	Temp.Ext.Media Desf.8h M3	Consumo M3	
Invierno	13-27 enero	13-ene	5,058	4,638	1745,65	4,613	1820,69	4,613	1448,58
		14-ene	4,567	4,608	1750,12	5,054	1761,26	5,054	1401,02
		15-ene	7,175	6,696	1430,23	6,479	1569,53	6,479	1247,56
		16-ene	5,217	6,325	1487,06	6,563	1558,32	6,563	1238,58
		17-ene	3,042	3,246	1958,91	3,183	2012,98	3,183	1602,49
		18-ene	1,446	1,588	2213,03	1,950	2178,93	1,950	1735,30
		19-ene	3,304	3,508	1918,68	3,283	1999,53	3,283	1591,72
		20-ene	2,163	2,175	2123,00	2,188	2146,97	2,188	1709,73
		21-ene	2,158	2,042	2143,44	2,163	2150,34	2,163	1712,42
		22-ene	3,779	3,775	1877,82	3,592	1958,04	3,592	1558,51
		23-ene	2,913	2,592	2059,15	2,479	2107,73	2,479	1678,32
		24-ene	3,546	2,421	2085,33	2,146	2152,58	2,146	1714,22
		25-ene	5,779	5,938	1546,44	5,788	1662,59	5,788	1322,04
		26-ene	5,517	5,913	1550,27	5,963	1639,05	5,963	1303,20
		27-ene	4,892	4,813	1718,83	4,833	1790,98	4,833	1424,80

Tabla III. Datos de Consumo en Wh (y) y Temperatura exterior en $^{\circ}\text{C}$ (x) para M1, M2 y M3. Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones.

La metodología desarrollada para este trabajo fin de grado, basado en la experimentación, ha resultado efectiva respecto a los objetivos inicialmente planteados, todos ellos alcanzados. A partir de los datos de la monitorización de las temperaturas interiores en los tres módulos de ensayo, y de los consumos eléctricos necesarios para su refrigeración/calefacción en el periodo estival/invernal, en este trabajo fin de grado se ha desarrollado una investigación cuyas principales conclusiones y aportaciones son las siguientes:

1. Para una determinada condiciones climáticas (próximas a las de Madrid) y de orientación (sur) de fachadas, se han elaborado diferentes modelos predictivos cuya aplicación permite obtener los consumos eléctricos necesarios para la climatización de los módulos, según su solución constructiva de fachada, a partir de las temperaturas medias exteriores de la localidad en diferentes periodos estacionales.
2. Mediante la aplicación de estos modelos predictivos es posible valorar la eficiencia energética de una solución de rehabilitación de fachada respecto de la original. En este trabajo fin de grado se ha valorado la eficiencia energética de la solución fachada ventilada y de la solución SATE respecto de la solución tradicional de fachada de doble hoja de fábrica de ladrillo: citara+cámara de aire+tabique (solución base). Los resultados obtenidos han sido los siguientes:
 - 2.1 En verano, la fachada ventilada mejora la eficiencia energética entre un 15-25%, respecto a la fachada base, dependiendo de la temperatura media exterior, mientras que esa mejora es algo menor: entre un 10-20% en la solución SATE. Ese incremento de la eficiencia aumenta con la temperatura exterior media, es decir, es más acusado en los días más calurosos.
 - 2.2 En invierno, la fachada ventilada no siempre mejora la eficiencia energética de la solución base. El margen oscila entre un - 8% y un +13% respecto del módulo base, es decir, incluso en determinados días del periodo tiene una eficiencia energética peor que la solución base, sobre todo porque reduce el efecto beneficioso de la radiación solar. En el sistema SATE hay siempre mejora de la eficiencia, y además con un incremento importante: 14-22%. Ese incremento de la eficiencia es más acusado en los días más fríos.
3. Igualmente, la aplicación de los modelos predictivos permite valorar la eficiencia de una solución de rehabilitación de la fachada tradicional, respecto de otra, en este caso, de la solución fachada ventilada respecto de la SATE. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:
 - 3.1 En verano, la solución de rehabilitación de la fachada base mediante fachada ventilada supone una mejora de la eficiencia energética respecto de la solución de rehabilitación SATE entre un 3-7%, dependiendo de la temperatura media exterior. Se tiende al incremento máximo de la horquilla cuando las temperaturas medias exteriores son las

- máximas del periodo y al mínimo cuando las temperaturas medias exteriores tienden a las mínimas del periodo.
- 3.2 En invierno se produce el efecto contrario, siendo entre un 10-20% más eficiente la solución de rehabilitación mediante el sistema SATE que con fachada ventilada, también dependiente de la temperatura media exterior. En este caso sucede a la inversa que en el periodo estival, siendo la diferencia entre una y otra solución de rehabilitación de fachada más acusada en el periodo invernal que en el estival. Esa diferencia crece cuanto más baja es la temperatura media exterior, por tanto, el incremento máximo de la horquilla se da con temperaturas exteriores mínimas en el periodo y el incremento mínimo de la horquilla se produce con las temperaturas medias máximas del periodo invernal.
4. Los modelos predictivos, con las restricciones impuestas por las hipótesis adoptadas, conocidas las temperaturas medias exteriores de donde estén ubicados los módulos, se pueden aplicar para hacer un pronóstico bastante ajustado de cuáles serían los consumos eléctricos derivados de la climatización de los módulos sin necesidad de monitorizar esos consumos, lo cuales estarán asociados a la solución de fachada y a los periodos estacionales. En el trabajo fin de grado se han aplicado para hacer una previsión de consumo de calefacción en el periodo invernal del 16 al 27 de enero, periodo en el que los módulos estuvieron en libre evolución y, por tanto, no estuvieron climatizados.

6. Ideas para ampliar el trabajo.

Una gran parte de las limitaciones que se han observado en las celdas implantadas en Madrid se van a resolver en un futuro muy próximo, ya que el grupo TEP-130 acaba de terminar la construcción de 4 celdas de ensayo en el centro Internacional de la Universidad de Sevilla que ahora se están equipando y cuyas obras está previsto que terminen a finales de este mes de julio (Fig. 51). Se hace



Fig. 51. Módulos de Sevilla en construcción. Fuente: Grupo de investigación TEP-130.

gracias a la financiación del proyecto denominado CELDA “Rehabilitación energética y ambiental de viviendas sociales en Andalucía: Evaluación con celdas de ensayo”, concedido al grupo TEP-130 por la Agencia de la Obra Pública de la Junta de Andalucía con fondos europeos (ref. G-GI3003/IDI0).

La continuidad de este trabajo fin de grado pasa por este equipamiento que permitirá comprobar la validez de sus conclusiones para la localización de Sevilla y zonas climáticas afines en Andalucía, así como completar la investigación con otras orientaciones, con presencia de huecos, con sistema de ventilación que permitan la disipación nocturna y, por supuesto, con otras soluciones de rehabilitación de fachadas.

7. Bibliografía

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

André Bontemps, Maha Ahmad, Kevin Johannès, Hébert Sallée. “Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls”. *Energy and Buildings*. No, 43, pp 2456-2461, 2011.

A. Piccolo. “Thermal performance of an electrochromic smart window tested in an environmental test cell”. *Energy and Buildings*. No, 42, pp 1409-1417, 2010.

CEC. “The Use of Outdoor Test Cells for Thermal and Solar Building Research within the PASSYS Project”. *Building and Environment* . Vol. 28, No,2, pp 107-113. 1993

Chin-Huai Young, Yi-Lin Chen, Po-Chun Chen. “Heat insulation solar glass and application on energy efficiency buildings”. *Energy and Buildings*. No, 78, pp 66-78, 2014.

H. Manz, P. Loutzenhiser, T. Frank, P.A. Strachan, R. Bindi, G. Maxwell. “Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes—Experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis”. *Building and Environment* . No, 41, pp 1784-1797, 2006.

Jennifer R. Gosselin, Qingyan (Yan) Chen. “A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window”. *Energy and Buildings* . No, 40, pp 452-458, 2008.

Jorge S. Carlos , Helena Corvacho , Pedro D. Silva , J.P. Castro-Gomes. “Modelling and simulation of a ventilated double window” *Applied Thermal Engineering*. No. 31, pp. 93-102, 2011.

Nuno M. Mateus, Armando Pinto, Guilherme Carrilho da Graca. “Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell”. *Energy and Buildings*. No, 75, pp 511-522, 2014.

P.A. Strachan y L. Vandaele. “Case studies of outdoor testing and analysis of building components”. *Building and Environment*. No, 43, pp 129-142, 2008.

P.A. Strachan. “Simulation support for performance assessment of building components”. *Building and Environment* . No, 43, pp 228-236, 2008.

Pablo La Roche y Murray Milne. “Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller”. *Solar Energy* . No. 77, pp 421–434, 2004.

Stéphane Guichard, Frédéric Miranville, Dimitri Bigot, Harry Boyer. “A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate: Model description and elements of validation”. *Energy and Buildings*. No, 70, pp 71-80 2014.

V.Leal, E.Maldonado. “The role of the PASLINK test cell in the modelling and integrated simulation of an innovative window”. *Building and Environment* . No, 43, pp 217-227, 2008.

PÁGINAS WEB

<https://www.construible.es/comunicaciones/ii-congreso-eecn-rehabilitacion-de-sistemas-constructivos-de-fachada>

<http://www.ni.com/testcell/esa/>

<http://www.boe.es/boe/dias/2013/04/13/pdfs/BOE-A-2013-3904.pdf>

www.boe.es/boe/dias/2013/06/27/pdfs/BOE-A-2013-6938.pdf

TESIS DOCTORALES

Arranz Arranz, B. *Optimización de la composición del hueco de fachada en materia de eficiencia energética. Propuesta de indicador como herramienta para el análisis integral del elemento acristalado.* Octubre 2013.

Del Valle Ruiz Valero, L. *Optimización y propuesta de sistema opaco de cerramiento multicapa ligero con estructura de light Steel frame como alternativa competitiva a los sistemas de cerramientos tradicionales.* Marzo 2013

OTROS

Barker, M. (2005). *El ahorro energético, CO2 y el desarrollo sostenible. Hacia una arquitectura sostenible.* ICARO CTAV Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia. España.