
TESI DOCTORAL

ESTUDIO DE LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA VENTILACIÓN EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CON EL USO DE RECUPERADORES DE CALOR

*Programa de Doctorat en Sostenibilitat
Institut de Sostenibilitat*

Autor: Oscar Ribé Torijano

Directores:

Dr. Jordi Cadafalch

Dr. Manel Quera



Agraïments

Aquest treball de tesi no haguera estat possible sense el suport incondicional i paciència dels companys de departament en Rafael Ruiz, en Manel Quera, en Jordi Cadafalch i en Josep Montserrat, que des del primer dia em van animar a realitzar aquest estudi que ara conclou.

També voldria fer esment especial a una persona m'ha ajudat en la realització dels mapes, que s'han pogut elaborar a partir del programari "ArcGIS", pertanyent a l'empresa Airbus Defence & Space (Intelligence business line), els quals han pogut representar de forma gràfica tots aquells valors que, dispersos i sobre un paper, poc podien dir. Aquest persona és el meu company de carrera, en Pere Roca.

Evidentment no tinc paraules per descriure el que la meva família i amics han hagut de suportar. Gràcies a ells, el llarg camí fins arribar aquí ha estat més plaent.

GRÀCIES a tots, que en cap moment m'heu deixat de banda i que sempre m'heu empès per arribar al final.

Voler és poder, i finalment s'ha aconseguit!!!

Terrassa, Setembre de 2018



Resumen

Los recuperadores de calor juegan un papel importante en la eficiencia y la sostenibilidad en el diseño de los sistemas de ventilación. El uso de un recuperador de calor sensible o entálpico es una decisión clave para los diseñadores de sistemas de ventilación. Sin embargo, hay una falta de herramientas, de fácil uso e interpretación, que sirvan para poder tomar esta decisión. Este estudio desarrolla una herramienta de decisión simple para los ingenieros basada en los valores hora a hora de las condiciones climáticas exteriores y que se puede aplicar a cualquier tipo de edificio. El resultado principal del estudio son una serie de mapas y tablas simples de interpretar. Con el fin de evaluar la credibilidad del modelo utilizado en el procedimiento, se han comparado los resultados obtenidos con otros resultados publicados. El estudio se centra en 48 localidades de ámbito español. El análisis de los resultados concluye que la recomendación aceptada en el mercado de usar recuperadores de calor de tipo entálpico en lugares con alta humedad relativa durante el verano debe ser reconsiderada.

Abstract

Energy recovery elements play a major role in the efficiency and sustainability of building ventilation systems. The use of a sensible or total energy recovery ventilator is a key decision for ventilation systems designers. However, there is a lack of technical tools and developments to support this decision. This study develop a simple decision tool for designers based on hourly values of the outdoor weather conditions and that can be applied to any kind of building. The main outcome of the study is a simple-to-use isoline maps and tables. In order to assess credibility of the model used in the procedure, results published in the literature have been used as a reference showing good accordance. As an example, the procedure has been applied to the Spanish area considering 48 different locations. Results have been presented and discussed. The analysis of the results concludes that the market-accepted recommendation of using energy recovery ventilators in locations with high relative humidity during the summer should be reconsidered.

Sumario

| | |
|--|-----------|
| AGRAÏMENTS | 1 |
| RESUMEN | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| SUMARIO | 5 |
| RELACIÓN DE FIGURAS | 9 |
| RELACIÓN DE TABLAS | 13 |
| GLOSARIO | 15 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1.1. Origen de la tesis..... | 17 |
| 1.2. Motivación | 18 |
| 1.3. Objetivo | 19 |
| 1.4. Alcance..... | 20 |
| 2. ESTADO DEL ARTE | 22 |
| 2.1. Ahorro energético y sostenibilidad | 22 |
| 2.2. Recerca bibliográfica | 24 |
| 2.3. Sistemas de climatización | 26 |
| 2.4. Influencia de la ventilación | 27 |
| 2.4.1. Necesidad de ventilación | 27 |
| 2.4.2. Cargas de ventilación..... | 28 |
| 2.5. Sistemas de ahorro energético en instalaciones de climatización | 29 |
| 2.5.1. Free cooling | 29 |
| 2.5.2. Recuperación de calor del aire de extracción | 31 |
| 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO | 41 |
| 3.1. Influencia de los recuperadores sobre la instalación..... | 41 |
| 3.1.1. Influencia directa del recuperador de calor | 41 |
| 3.1.2. Influencia indirecta del recuperador de calor..... | 42 |
| 3.2. Consideraciones (hielo, condensación, eficiencia variable, ...) | 46 |
| 3.2.1. Eficiencia variable del recuperador de calor..... | 46 |
| 3.2.2. Condensación y formación de hielo | 47 |
| 3.3. Descripción de los parámetros de comparación | 50 |
| 3.3.1. Emplazamientos: Datos climáticos..... | 50 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3.2. | Condiciones exteriores del aire de ventilación | 53 |
| 3.3.3. | Descripción edificios y usos: Caracterización de la ocupación | 55 |
| 3.4. | Regulación del recuperador | 57 |
| 3.4.1. | Zonas de recuperación sobre el diagrama psicrométrico..... | 57 |
| 3.4.2. | Regulación tradicional..... | 58 |
| 3.4.3. | Regulación alternativa propuesta..... | 61 |
| 3.5. | Consumos adicionales..... | 64 |
| 3.5.1. | Consumo ventiladores | 65 |
| 3.5.2. | Consumo motor recuperador rotativo | 65 |
| 3.5.3. | Consumo enfriamiento adiabático..... | 65 |
| 3.5.4. | Contabilización sobreconsumo | 66 |
| 3.6. | Influencia de la ocupación y uso del edificio | 70 |
| 3.7. | Formulación | 72 |
| 3.7.1. | La carga de ventilación | 72 |
| 3.7.2. | Potencia recuperada..... | 75 |
| 3.7.3. | Energía recuperada | 75 |
| 3.7.4. | Potencial máximo de recuperación | 76 |
| 3.7.5. | Perfil de ocupación | 77 |
| 3.7.6. | Validación de la formulación | 78 |
| 3.8. | Procedimiento | 79 |
| 3.8.1. | Condiciones interiores y exteriores | 79 |
| 3.8.2. | Sobre el control de humedad | 80 |
| 3.8.3. | Criterio para el cambio de temporada Verano/Invierno..... | 81 |
| 4. | RESULTADOS | 83 |
| 4.1. | Leyendas de los mapas de resultados | 83 |
| 4.2. | Potencial máximo de recuperación (regulación. Convenc.) | 85 |
| 4.2.1. | Mapas de potencial de recuperación máxima en verano | 87 |
| 4.2.2. | Mapas de potencial de recuperación máxima en invierno | 89 |
| 4.2.3. | Mapas de potencial de recuperación máxima anual | 90 |
| 4.3. | Regulación Alternativa de recuperadores entálpicos..... | 91 |
| 4.3.1. | Mapas de potencial máximo de recuperación con regulación alternativa | 93 |
| 4.3.2. | Regulación alternativa vs regulación convencional..... | 94 |
| 4.4. | Resultados según perfil de ocupación | 94 |
| 4.4.1. | Centros docentes..... | 96 |
| 4.4.2. | Oficinas..... | 100 |
| 4.4.3. | Comercial..... | 104 |
| 4.4.4. | Hoteles..... | 108 |
| 4.4.5. | Centros de Atención Primaria (CAP's) | 112 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.5. | Mapas con fluctuación de humedad relativa interior | 116 |
| 4.5.1. | Límites de fluctuación según condiciones de confort RITE [5] | 116 |
| 4.5.2. | Límites de fluctuación RITE extendidos | 117 |
| 5. | ESTUDIO DE ANÁLISIS INMEDIATO | 121 |
| 5.1. | Objetivo | 121 |
| 5.2. | Opciones estudiadas | 121 |
| 5.2.1. | Zonas climáticas | 121 |
| 5.2.2. | La humedad absoluta media como magnitud clave | 123 |
| 5.3. | Comparativa de resultados | 124 |
| 6. | CONCLUSIONES | 127 |
| 7. | TRABAJOS FUTUROS | 129 |
| 8. | BIBLIOGRAFÍA | 131 |



Relación de figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Unidad de tratamiento de aire primario, y unidad interior de tratamiento | 20 |
| Fig. 2. Distribución de consumo de energía en edificios (fuente. Secret. Gral. de Energía) | 22 |
| Fig. 3. Distribución de cargas térmicas y consumos en oficinas (fuente. Elaboración propia) | 23 |
| Fig. 4. Esquema de instalación Agua-Aire con climatizador de aire primario y recuperador | 27 |
| Fig. 5. Representación de las cargas de ventilación en el diagrama psicrométrico | 28 |
| Fig. 6. Perfil de cargas cubiertas por el free-cooling | 29 |
| Fig. 7. Climatizador en modo “Free-cooling” | 30 |
| Fig. 8. Gráfico de regulación del free-cooling sensible con caudal de impulsión constante | 31 |
| Fig. 9. Cuerpo y recuperador estático sensible (Soler & Palau / Sodeca) | 33 |
| Fig. 10. Esquema del mecanismo de transferencia de calor y masa en un recuperador entálpico tipo membrana (Ref: Liu et al [28]) | 34 |
| Fig. 11. Cuerpo y recuperador estático entálpico de placas de celulosa (Mitsubishi / Hitachi) | 34 |
| Fig. 12. Recuperador de calor sensible aire-aire tipo rotativo (Sodeca / Heatex) | 35 |
| Fig. 13 Representación esquemática de un recuperador (HRV o ERV) | 37 |
| Fig. 14 Proceso de transferencia de calor sensible en un HRV sobre el diagrama psicrométrico (modo refrigeración) | 38 |
| Fig. 15 Proceso de transferencia de calor sensible y latente en un ERV sobre el diagrama psicrométrico (modo refrigeración) | 39 |
| Fig. 16. Pérdida de carga en un recuperador tipo | 42 |
| Fig. 17. Representación de la influencia de la recuperación de calor sobre la temperatura de superficie | 43 |
| Fig. 18. Influencia de la temperatura de evaporación sobre las prestaciones del equipo frigorífico | 44 |
| Fig. 19. Variación de la temperatura de superficie en función de la tipología de recuperador | 44 |
| Fig. 20. Recuperación de cantidades porcentuales iguales de calor sensible i latente | 45 |
| Fig. 21. Mayor recuperación de calor sensible que latente | 45 |
| Fig. 22. Mayor recuperación de calor latente que sensible | 46 |
| Fig. 23. Recuperación sensible con condensación | 47 |
| Fig. 24. Precaentamiento del aire exterior de entrada al recuperador | 49 |
| Fig. 25. Bypass del flujo de aire exterior | 50 |
| Fig. 26. Recuperadores de doble cuerpo de intercambio de calor | 50 |
| Fig. 27. Mapa representando las ciudades que se estudiarán | 51 |
| Fig. 28. Representación de los datos climáticos del conjunto de todas las poblaciones en un diagrama psicrométrico | 53 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 29. Ejemplo de nubes de puntos anual de condiciones climáticas | 54 |
| Fig. 30. Perfil horario de ocupación según IDAE | 56 |
| Fig. 31 Zonas de recuperación de calor sensible (izquierda) y entálpica (derecha) | 57 |
| Fig. 32 Zonas de recuperación de calor sensible y entálpica en invierno y verano | 58 |
| Fig. 33 Nubes de condiciones climáticas en verano de Madrid y Barcelona | 59 |
| Fig. 34 Nubes de condiciones climáticas en invierno de Madrid y Barcelona | 60 |
| Fig. 35 Zonas de recuperación de calor sensible, latente y entálpica en invierno y verano | 61 |
| Fig. 36 Zonas de recuperación entálpica en verano: tradicional (izquierda) y con la regulación propuesta (derecha) | 64 |
| Fig. 37 Zonas de recuperación entálpica en invierno: tradicional (izquierda) y con la regulación propuesta (derecha) | 64 |
| Fig. 38 Diferencias de entalpia en la ventilación (verano) | 72 |
| Fig. 39 Entalpías en la ventilación de un ambiente seco | 73 |
| Fig. 40 Potencial de recuperación Verano: H_{s_ver} , H_{t_ver} , ΔH_{ts_ver} | 87 |
| Fig. 41 Potencial de recuperación Invierno: H_{s_inv} , H_{t_inv} , ΔH_{ts_inv} | 89 |
| Fig. 42 Potencial de recuperación Anual: H_s , H_t , ΔH_{ts} | 90 |
| Fig. 43 Potencial de recuperación entálpica con regulación alternativa: H_{t_ver} , H_{t_inv} , H_t | 93 |
| Fig. 44 Variación % potencial de recuperación anual: regulación tradicional vs alternativa. | 94 |
| Fig. 45 Potencial de recuperación por persona en centros docentes: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 97 |
| Fig. 46 Potencial de recuperación por kg _{as} en centros docentes: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 98 |
| Fig. 47 Pérdida % potencial de recuperación anual H_i : centro docente vs máximo. | 99 |
| Fig. 48 Potencial de recuperación por persona en oficinas: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 101 |
| Fig. 49 Potencial de recuperación por kg _{as} en oficinas: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 102 |
| Fig. 50 Pérdida % potencial de recuperación anual H_i oficinas: vs máximo. | 103 |
| Fig. 51 Potencial de recuperación por persona en local comercial: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 105 |
| Fig. 52 Potencial de recuperación por kg _{as} en local comercial: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 106 |
| Fig. 53 Pérdida % potencial de recuperación anual H_i : comercio vs máximo. | 107 |
| Fig. 54 Potencial de recuperación por persona en hotel: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 109 |
| Fig. 55 Potencial de recuperación por kg _{as} en hotel: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 110 |
| Fig. 56 Pérdida % potencial de recuperación anual H_i : hotel vs máximo. | 111 |
| Fig. 57 Potencial de recuperación por persona en CAP's: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 113 |
| Fig. 58 Potencial de recuperación por kg _{as} en CAP's: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 114 |
| Fig. 59 Pérdida % potencial de recuperación anual H_i : CAP vs máximo. | 115 |
| Fig. 60 Potencial de recuperación con fluctuación límite RITE: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 116 |
| Fig. 61 Variación % potencial de recuperación con fluctuación límite RITE vs máximo. | 117 |
| Fig. 62 Potencial de recuperación con fluctuación RITE extendida: ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts} | 118 |
| Fig. 63 Variación % potencial de recuperación con fluctuación RITE extendida vs máximo. | 119 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 64. Zonas climáticas según clasificación ASHRAE | 122 |
| Fig. 65. Diferencia humedad absoluta media exterior e interior (verano + invierno) | 124 |
| Fig. 66. Diferencia humedad absoluta media exterior e interior (verano + invierno) | 125 |



Relación de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Condiciones interiores de diseño RITE (tabla 1.4.1.1) | 20 |
| Tabla 2. Sistemas Centralizados de Climatización | 26 |
| Tabla 3. Caudales de aire exterior (Tabla 2.4.5.1 del RITE) | 32 |
| Tabla 4. Comparativa y características de diferentes tipologías de recuperadores de calor | 37 |
| Tabla 5. Temperatura límite de formación de hielo | 48 |
| Tabla 6. Caudales de aire exterior (tabla 1.4.2.1 RITE) | 57 |
| Tabla 7. Posibilidades de recuperación sensible y entálpica en las diferentes zonas | 58 |
| Tabla 8. Posibilidades de recuperación sensible, latente y entálpica en las diferentes zonas | 61 |
| Tabla 9. Posibilidades de recuperación regulación convencional vs. Regulación alternativa | 63 |
| Tabla 10. Sobreconsumo ventilador por incorporar recuperador y filtros, recuperador estático | 67 |
| Tabla 11. Sobreconsumo ventilador por incorporar recuperador y filtros, recuperador rotativo | 69 |
| Tabla 12. Perfil de ocupación para un centro de atención primaria (CAP) | 71 |
| Tabla 13. Valor de δ_n según tipo de recuperador, estación, regulación y zona | 77 |
| Tabla 14. Leyenda potenciales de recuperación: H | 83 |
| Tabla 15. Leyenda comparativa del potencial de recuperación entre ERV y HRV: ΔH | 84 |
| Tabla 16. Potencial máximo de ahorro anual con regulación tradicional (MJ/kg _{as}) | 86 |
| Tabla 17. Regulación convencional vs Regulación alternativa propuesta | 92 |
| Tabla 18. Potencial anual de recuperación en MJ/persona (IDA-2) | 95 |
| Tabla 19. Potencial de ahorro anual, en MJ/persona, para un centro docente (IDA-2) | 96 |
| Tabla 20. Potencial de ahorro, en MJ/año/persona, para unas oficinas (IDA-2) | 100 |
| Tabla 21. Potencial de ahorro, en MJ/año/persona, para comercios (IDA-3) | 104 |
| Tabla 22. Potencial de ahorro, en MJ/año/persona, para hoteles (IDA-2) | 108 |
| Tabla 23. Potencial de ahorro, en MJ/año/persona, para un CAP (IDA-3) | 112 |



Glosario

| | |
|--------------------------|---|
| <i>CAP</i> : | Centro de Atención Primaria |
| <i>ERV</i> : | Recuperador entálpico (del inglés <i>Energy Recovery Ventilator</i>) |
| <i>F</i> : | Factor de corrección |
| <i>FCS</i> : | Factor de calor sensible |
| <i>H</i> : | Potencial de recuperación de energía |
| <i>HRV</i> : | Recuperador sensible (del inglés <i>Heat Recovery Ventilator</i>) |
| <i>h</i> : | Entalpia |
| <i>IDA</i> : | Calidad de aire interior |
| <i>IT</i> : | Instrucción Técnica |
| <i>m</i> : | Caudal másico |
| <i>ODA</i> : | Calidad de aire exterior |
| <i>P</i> : | Presión |
| <i>q</i> : | Carga o potencia térmica |
| <i>R</i> : | Energía recuperada |
| <i>RITE</i> : | Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios |
| <i>Q</i> : | Caudal volumétrico |
| <i>T_i</i> : | Temperatura |
| <i>V_{esp}</i> : | Volumen específico |
| <i>w</i> : | Humedad absoluta |
| <i>W</i> : | Potencia |

Griegas

| | |
|-----------------|---------------------------------------|
| δ : | coeficiente binario de funcionamiento |
| Δ : | Incremento o diferencia |
| ε : | Eficiencia |
| φ : | Humedad relativa |
| η : | Rendimiento eléctrico |
| ρ : | densidad |

Subíndices

| | |
|-------------|---|
| <i>as</i> : | aire seco |
| <i>i</i> : | interior |
| <i>ie</i> : | aire interior de extracción a la salida del recuperador |

| | |
|----------------|---|
| <i>imp:</i> | impulsión |
| <i>inv:</i> | invierno |
| <i>l:</i> | latente |
| <i>max:</i> | máximo |
| <i>mezcla:</i> | mezcla de aire exterior y de retorno interior |
| <i>n:</i> | instante |
| <i>N:</i> | instante final |
| <i>o:</i> | exterior |
| <i>ocup:</i> | ocupación |
| <i>os:</i> | aire exterior a la salida del recuperador |
| <i>rec:</i> | recuperador |
| <i>s:</i> | sensible |
| <i>t:</i> | total |
| <i>ts:</i> | diferencia entre total y sensible |
| <i>v:</i> | <i>ventilación</i> |
| <i>vent:</i> | <i>ventilación o ventilador</i> |
| <i>ver:</i> | verano |
| <i>w:</i> | vapor |
| <i>ws:</i> | vapor saturado |

NOTA: Todas las unidades estarán expresadas en el Sistema Internacional

1. Introducción

1.1. Origen de la tesis

En la mayoría de países desarrollados el consumo de energía en los edificios (residenciales y comerciales) representa entre el 20 y el 40 % de la energía total utilizada, superando incluso el consumo del sector de la industria y del transporte, según Perez-Lobard et al. [1].

Alrededor del 50 % del consumo de energía en los edificios está asociado a los sistemas de HVAC [1], y una parte significativa de dicho consumo se debe a la necesidad de ventilación, ver cap. 14 de ASHRAE Fundamentals [2].

Con el objetivo de reducir el consumo energético de los edificios, la UE ha aprobado la 2010/31/EU Directive [3], que especifica que los nuevos edificios construidos en la UE a partir de 2020 (y los edificios públicos a partir de 2018) deberán ser de muy bajo consumo energético, denominados NZEB (nearly zero-energy buildings).

Desde el punto de vista constructivo, este tipo de edificios presentan, entre otras características, un elevado nivel de aislamiento térmico y de estanqueidad para minimizar las infiltraciones no controladas de aire. Esto permite reducir el consumo energético de calefacción y refrigeración, pero obliga a mantener un sistema de ventilación controlada, que permita garantizar un mínimo de calidad de aire interior del edificio.

La mayoría de países tienen fijado por normativa el caudal de ventilación mínimo que depende del tipo de edificios y de su nivel de ocupación, como la norma ASHRAE Standard 62.1 en Estados Unidos [4] y el RITE en España [5].

En este nuevo escenario el consumo energético asociado a la ventilación tendrá una importancia relativa mayor.

Si además se considera la creciente necesidad de mejora en la eficiencia energética, se puede entender el protagonismo que han cobrado en estas instalaciones tanto los sistemas de *free-cooling* como los recuperadores de calor, siendo estos últimos elementos el foco de atención de este estudio.

Es por este motivo que toma una importancia relevante todo el ahorro energético que se pueda obtener en el proceso de ventilación, el cual se puede mejorar significativamente con el uso inteligente de los recuperadores de calor que, a fecha de hoy, no se da en la mayoría de las instalaciones, derrochando absurdamente, en muchos casos, un enorme potencial de ahorro energético.

Aunque este tema ha sido ampliamente abordado en otros estudios, [3] y [6], en esta tesis se quiere profundizar en la dependencia directa de este ahorro con las condiciones del aire exterior, con el fin de poder identificar de forma rápida y sencilla, el sistema de mayor potencial de ahorro en base a zonas climáticas y tipologías de uso.

1.2. Motivación

El actual RITE [5] en su IT 1.2.4.5 “recuperación de energía” expresa claramente cuáles son las exigencias técnicas que han de cumplir las instalaciones de climatización en lo que refiere a la recuperación de calor en el aire de ventilación.

Se exige recuperación de energía del aire de extracción a partir de cierto caudal, la instalación de equipos de enfriamiento adiabático, unas eficiencias mínimas de recuperación de calor sensible sobre el aire exterior y unas pérdidas de presión máximas en función de las horas de funcionamiento.

Esta reglamentación es muy genérica y posiblemente poco exigente, dejando en manos de los técnicos buena parte de la decisión de cómo recuperar energía en la ventilación.

Así, por ejemplo, el enfriamiento indirecto del aire exterior que se realiza con un recuperador sensible y humidificación adiabática es muy beneficioso dependiendo de la situación climática, pero, en climas húmedos no es conveniente utilizarlo.

Tampoco especifica qué tipo de energía se debe recuperar y éste es un aspecto realmente importante, pues recuperando únicamente el % mínimo exigido de la energía sensible ya se cumple con la normativa, a pesar de que, en muchas ocasiones, ésta representa una pequeña parte del total, siendo la energía latente (debida a su humedad) la que es realmente significativa, al ser la más costosa energéticamente de tratar, con lo que ofrece un gran potencial de ahorro.

Unos primeros estudios ya nos indican que los parámetros ambientales exteriores serán determinantes para elegir el mejor sistema de recuperación. Y por lo tanto será muy importante hacer un buen tratamiento de los datos de estas condiciones exteriores para la sensibilidad que tienen sobre los resultados finales del estudio.

Uno de los aspectos en el que pretende profundizar esta tesis, es la incidencia de estas condiciones climáticas, y cómo se comportan diferentes recuperadores de calor bajo ellas, con el objetivo de extraer conclusiones que permitan establecer qué tipo de sistema de recuperación de calor es el más adecuado, aportando datos cualitativos y cuantitativos que lo avalen.

1.3. Objetivo

A la vista de la importancia del ahorro energético y de la dificultad que hay a día de hoy de poder tomar una decisión rápida y segura sobre cuál es el mejor sistema de recuperación de calor a emplear en sistemas de ventilación, el objetivo del presente estudio será poder facilitar las herramientas necesarias para que esta elección sea lo más sencilla e intuitiva posible.

El presente trabajo se centrará fundamentalmente en la influencia de las condiciones climáticas exteriores para el ahorro de energía en instalaciones de climatización, utilizando recuperadores de calor en ventilación, independientemente del tipo de edificio, teniendo presente las siguientes bases de cálculo:

- Se utilizarán los datos climáticos exteriores hora a hora correspondientes a 48 capitales de España [7].
- Se considerarán dos tipos de recuperadores del aire de ventilación (HRV y ERV) con el objetivo de determinar cuál es el más adecuado para cada zona y en cada época del año.

Se calculará para cada una de las ciudades escogidas las diferencias de entalpía sensible, latente y total, según estemos en época de verano o invierno, para obtener los potenciales de ahorro existentes.

Estos valores serán llevados a un mapa y permitirán trazar curvas de nivel que identifiquen las zonas geográficas de mayor o menor potencial de ahorro energético con cada uno de los tipos de recuperadores. Además, si se calcula la diferencia de energías recuperadas entre el ERV respecto el HRV, cuanto mayor sea ésta, más recomendable será la utilización del primero.

El estudio se centrará pues, en la importancia de las condiciones climáticas, y aportará información que justificará la elección de un HRV o un ERV en función de las mismas, y al objeto de que tenga el carácter más genérico posible, se elude la concreción en las instalaciones, eficiencia de la recuperación en la tipología y uso del edificio, de modo que los resultados servirán de base para el estudio posterior de cualquier caso concreto.

Posteriormente se estudiará la influencia del sistema de regulación que actualmente se utiliza, determinando se éste es el más adecuado o, por el contrario, hay métodos que permitan obtener un mayor potencial de ahorro.

1.4. Alcance

Para poder llegar al objetivo de poder de determinar el máximo potencial de ahorro que se puede conseguir en el aire de ventilación con la utilización de los recuperadores de calor en función de las condiciones ambientales exteriores, se partirá de:

- La utilización de los datos climatológicos estadísticos de las principales ciudades de España (48 poblaciones), con la información hora a hora de temperatura y humedad de aire exterior, durante 365 días, discriminando la temporada de verano de la de invierno.
- Un sistema todo-aire, constituido por 2 sub-sistemas, cada uno de ellos incorporando un tipo diferente de unidad de tratamiento de aire:
 - o Unidad primaria de tratamiento: encargado de suministrar el caudal de aire de ventilación del edificio y usualmente permite compensar total o parcialmente la carga de ventilación. En el presente trabajo se supone que este equipo está constituido por: ventilador de impulsión de aire, ventilador de extracción de aire y recuperador de calor, bien sea de tipo HVR o bien ERV.
 - o Unidad interior de tratamiento: encargado de recircular el aire interior y realizar el tratamiento térmico e higrométrico de dicho aire a fin de mantener las condiciones interiores de confort fijadas temperatura y humedad. Este equipo permite compensar las cargas externas e internas del edificio.

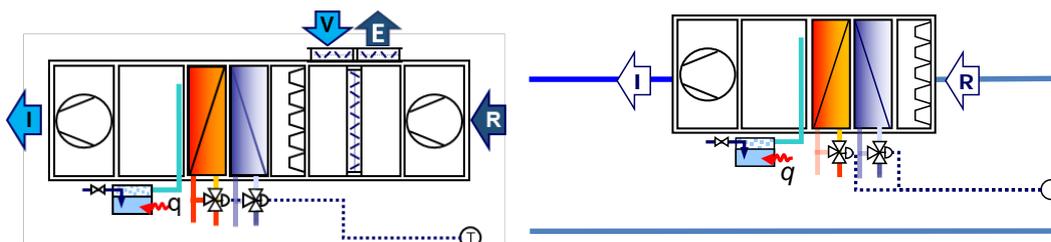


Fig. 1. Unidad de tratamiento de aire primario, y unidad interior de tratamiento

- Una instalación de climatización que permita mantener el aire interior del edificio dentro de las horquillas que marca el RITE [5] que en la IT 1.1.4.1.2 indica que las condiciones interiores de diseño serán las de la siguiente tabla:

| Estación | Temperatura operativa °C | Humedad relativa % |
|----------|-----------------------------|-----------------------|
| Verano | 23...25 | 45...60 |
| Invierno | 21...23 | 40...50 |

Tabla 1. Condiciones interiores de diseño RITE (tabla 1.4.1.1)

Para concretar los resultados de este estudio, y respetando la tabla anterior, se han utilizado unas condiciones termohigrométricas, que con frecuencia se emplean en el diseño de instalaciones de climatización:

- Invierno: $T_i = 21 \text{ °C}$, $\varphi_i = 40 \%$
 - Verano: $T_i = 24 \text{ °C}$, $\varphi_i = 50 \%$
- De un recuperador genérico, tanto sensible como entálpico, con una eficiencia del recuperador del 100%, hipótesis que permitirá establecer el máximo potencial de ahorro, que, posteriormente se podrá ajustar en base a la eficiencia real que se pueda tener con un recuperador concreto.

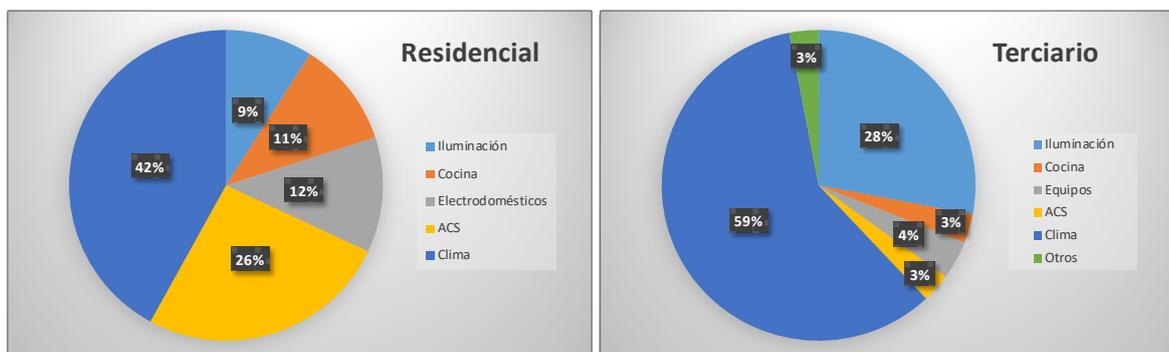
2. Estado del arte

2.1. Ahorro energético y sostenibilidad

El nivel de ventilación, en un edificio, afecta directamente a la calidad del aire interior IAQ [8], por lo que en gran número de países existen normas oficiales, ver [7] y [5], que fijan el caudal mínimo de aire de ventilación en función del tipo de edificio y el nivel de ocupación.

El proceso de ventilación consiste básicamente en la entrada de aire exterior limpio y la extracción de aire interior contaminado por la actividad propia del edificio. Este proceso supone un importante consumo energético para la instalación HVAC, y aquí es donde los sistemas de recuperación de energía aire-aire entre el aire exterior de entrada y el aire interior de extracción cobran su importancia con el objetivo de reducir dicho consumo de energía.

Esta renovación del aire, o ventilación, supone un importante gasto energético, que en ocasiones puede llegar a superar el 50% del consumo del sistema de climatización que lo ha de tratar, el cual, tal como muestran las figuras siguientes, es el elemento de mayor consumo en los edificios.



Los recuperadores de calor son dispositivos que llevan muchos años utilizándose a nivel industrial, pero es desde que se ha tomado conciencia de la importancia del ahorro energético y el impacto medioambiental que han comenzado a introducirse en el sector de la climatización de confort.

Existen actualmente gran diversidad de equipos que permiten esta recuperación de energía, ver ASHRAE [9], siendo los más utilizados los *HRV* y los *ERV*.

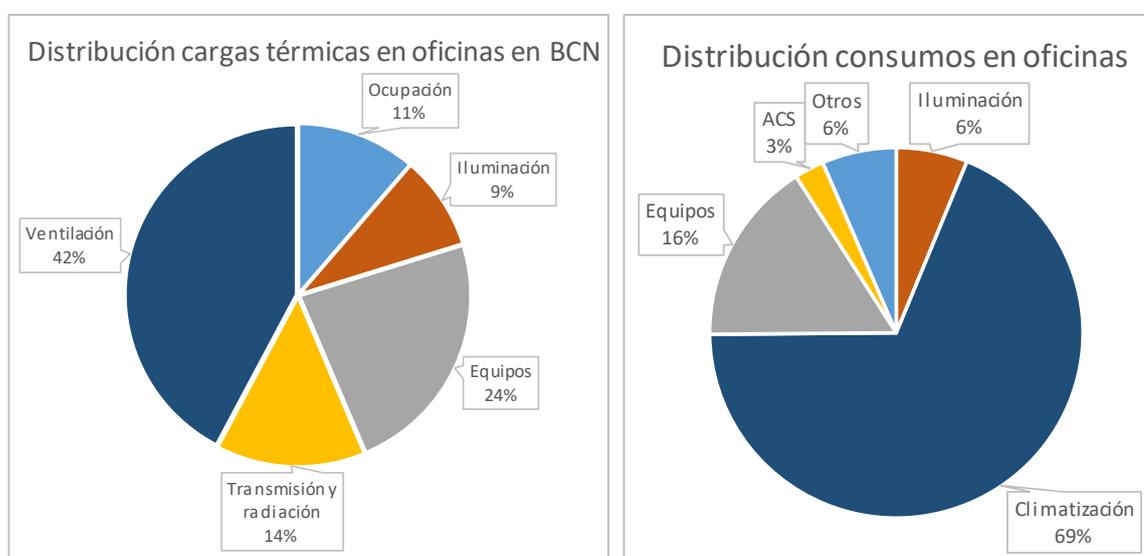
- *HRV* (heat recovery ventilators): permiten la recuperación de calor sensible entre el aire exterior (*outdoor supply air*) y el aire interior de extracción (*indoor exhaust air*).
- *ERV* (energy recovery ventilators): permiten la recuperación de calor y vapor de agua (moisture) entre ambas corrientes de aire.

Información general sobre dicho tipo de equipos puede consultarse en publicaciones de ASHRAE [9], Zen et al. [6], Jeong and Mumma [10] y Woods [11]. Nuevos estudios y trabajos en recuperadores, en especial entálpicos, han sido realizados por Al-Waked et al. [12], Min and Duan [13], Deshko et al. [14] y Alonso et al. [15].

Son múltiples los factores que inciden en la elección del mejor recuperador de calor para una instalación concreta. Una mala elección puede representar que este ahorro que se espera obtener no sea tan notable como se deseaba.

Los factores que mayor influencia pueden ejercer sobre el comportamiento global del sistema pueden ser: la tipología de recuperador (sensible o entálpico); climatología del entorno donde se encuentra la instalación; relación entre la carga de ventilación y la carga total a cubrir; etc.

A modo de ejemplo podemos estudiar una oficina de unos 500 m², con una ocupación de 50 personas, situada en Barcelona. El resumen de necesidades térmicas para estas oficinas sería:



Suponiendo que el sistema de climatización para estas oficinas funciona 2250 horas al año, la energía consumida sería de 120000 kWh/año, lo que representa, según el MIX peninsular publicado por la Oficina Catalana del Cambio Climático en 2016 (308 gr CO₂/kWh), unas emisiones a la atmósfera de 36700 kg de CO₂.

Con el uso de recuperadores de calor para la ventilación, que fueran capaces de reducir la carga de ventilación en un mínimo del 50%, el consumo anual debido a la climatización se reduciría a 94500 kWh/año y las emisiones a 28900 kg de CO₂, una reducción de 22%.

2.2. Recerca bibliogràfica

Gran número de estudios han sido realizados con el objetivo de analizar el ahorro energético conseguido en una instalación de climatización, utilizando un determinado sistema de recuperación de energía de ventilación (sensible o entálpico), para un determinado tipo de edificio (residencial o comercial) y para unas determinadas condiciones climatológicas exteriores (una o varias zonas climáticas).

Deben destacarse los estudios de edificios residenciales realizados por Liu et al. [16], Dodon et al. [17], Zhang et al. [18] y NG and Payne [19].

En edificios comerciales deben citarse los estudios de Rasouli et al. [20], Kang et al. [21], Zhong et al. [22] y Wang et al. [23].

El análisis de estos trabajos permite deducir dos conclusiones relevantes. Por una parte, si el estudio debe tener presente todos los parámetros que influyen en los resultados finales, resulta casi imprescindible la utilización de un software o herramienta de cálculo potente tipo TRNSYS [24] o EnergyPlus [47]. La utilización de estas herramientas de cálculo puede resultar compleja y requerir experiencia y tiempo, situación usualmente alejada de las capacidades y medios disponibles para un técnico que debe diseñar una instalación de climatización de un edificio.

Por otra parte, el estudio de los trabajos citados permite deducir que uno de los factores más importantes son las condiciones climáticas exteriores.

Entre los centrados en las condiciones exteriores encontramos que Lazzarin and Gasparella [25] realizaron uno de los primeros estudios sobre el tema, centrado en el análisis técnico y económico de la recuperación de energía en sistemas de ventilación, utilizando HRV y ERV, para tres zonas climáticas diferentes de Italia. El estudio comprendía, tanto el período de calefacción como de refrigeración del edificio, llegando a la conclusión que para climas fríos (*cold weather*) la opción más interesante es la utilización de ERV y para climas templados y calurosos (*warm and hot weather*) la mejor opción es HRV (invierno) y HRV con enfriamiento adiabático (verano).

Asimismo, debe citarse a Guillén-Lambea et al. [26], que realizaron un estudio sobre el potencial de recuperación máxima de calor sensible y latente del aire de ventilación para 14 ciudades de España, representativas de zonas cálidas y húmedas del sur de Europa.

Dichos trabajos, no obstante, están limitados a un número limitado de ciudades o zonas climáticas y no utilizan una base completa de datos climatológicos horarios anuales.

Por otra parte, Ke and Yanming [27] analizaron dos sistemas de ventilación diferentes, utilizando recuperadores HRV y ERV, para cuatro zonas climáticas de China, y realizaron el cálculo del consumo anual de energía (verano e invierno) con dichos sistemas. Como conclusión determinaron para cada sistema de ventilación y para cada zona climática la solución con menor consumo de energía entre diversas opciones: recuperador HRV, recuperador ERV, recuperador combinado HRV-ERV y recuperador combinado ERV-ERV.

Encontramos también estudios centrados en ventilación en edificios residenciales, así Liu et al [28] estudiaron la utilización de ERV para un edificio residencial, ubicado en cinco zonas climáticas diferentes de China, que permitía un ahorro de energía en invierno entre 10 y 20 %, dependiendo de la zona climática.

Dodon et al [29] analizaron durante el período de calefacción la utilización de un sistema de ventilación con HRV para un edificio residencial situado en Suecia, con dos variantes constructivas (edificio convencional y construcción pasiva). El ahorro de energía final (calor y electricidad) que permitía la utilización del HRV era del 55 % para el edificio convencional y del 22 % para la construcción pasiva.

También encontramos algunos trabajos relacionados con sistemas de ventilación para edificios comerciales: Zhou et al [30] realizan un estudio comparativo de utilización de recuperadores HRV y ERV para una oficina, situado en dos zonas climáticas de China (Shanghai y Beijing), durante la temporada de invierno y de verano. El estudio determina, en función de la temperatura exterior, el tipo de recuperador más interesante en cada zona climática.

Rasouli et al [31] realizaron asimismo un estudio comparativo de recuperadores HRV y ERV para un edificio de oficinas, situado en cuatro zonas climáticas de USA. Dependiendo de la zona climática, los recuperadores ERV permiten obtener un ahorro de energía de hasta el 40 % (invierno) y del 20 % (verano).

Kang et al [32] analizan comparativamente la utilización de ERV y HRV para un edificio comercial con alta densidad de ocupación (supermercado), situado en cuatro zonas climáticas de China, durante el invierno. Su estudio permite deducir que el HRV es la solución más conveniente para la mayoría de zonas climáticas. Asimismo, proponen tres modos distintos de operación del recuperador, en función de la temperatura exterior.

Zhong et al [33] realizaron un estudio similar para un supermercado, situado en cuatro zonas climáticas de China, utilizando HRV, durante invierno y verano. Proponen diferentes modos de operación del recuperador (operativo o no operativo) también función de la temperatura exterior.

2.3. Sistemas de climatización

La climatización de un local consiste en controlar las características del aire interior para adecuarlo a las condiciones de confort requeridas por sus ocupantes, además de mantener el nivel adecuado de ventilación y calidad de aire.

Son múltiples los criterios bajo los que se pueden clasificar los sistemas de climatización, si bien parece razonable que nos fijemos en aquellas instalaciones donde el consumo sea elevado y en consecuencia también lo sea el potencial de ahorro energético en la ventilación. Estamos hablando pues de edificios con un sistema de climatización centralizado, dejando por tanto de lado las instalaciones de pequeñas dimensiones equipadas generalmente con sistemas autónomos.

| SISTEMAS CENTRALIZADOS | | |
|--|--|-------------------|
| Equipos | Características | Tipo de sistema |
| Divididos enfriados por aire | Multi-split VRF - VRV (volumen de refrigerante variable) | Todo refrigerante |
| | VRF - VRV + climatizador de aire primario | Refrigerante-Aire |
| Planta enfriadora de agua y caldera o Bomba de calor | Fan-coils individuales | Todo agua |
| | Climatizador (UTA) Unizona o multizona de volumen constante o variable (VAV) | Todo aire |
| | Fan-coil individual + climatizador de aire primario | Agua-Aire |
| | Inducción | Agua-Aire |
| | Techo frío | Agua-Aire |

Tabla 2. Sistemas Centralizados de Climatización

Los requerimientos de este tipo de edificios les exige disponer de un sistema de ventilación, por lo que en la práctica los sistemas "Todo Refrigerante", o "Todo Agua", serán respectivamente en realidad "Refrigerante-Aire" y "Agua-Aire", conjuntamente con los Aire-Aire.

Todos deben disponer de un sistema de ventilación, a menudo trabajando en paralelo al de climatización, con el ya comentado climatizador de aire primario, el cual irá dotado del recuperador de calor el cual es el objeto de este estudio.

Como ejemplo de instalación con climatizador de aire primario se muestra, de forma esquemática en la siguiente figura, un sistema 4 tubos Agua-Aire.

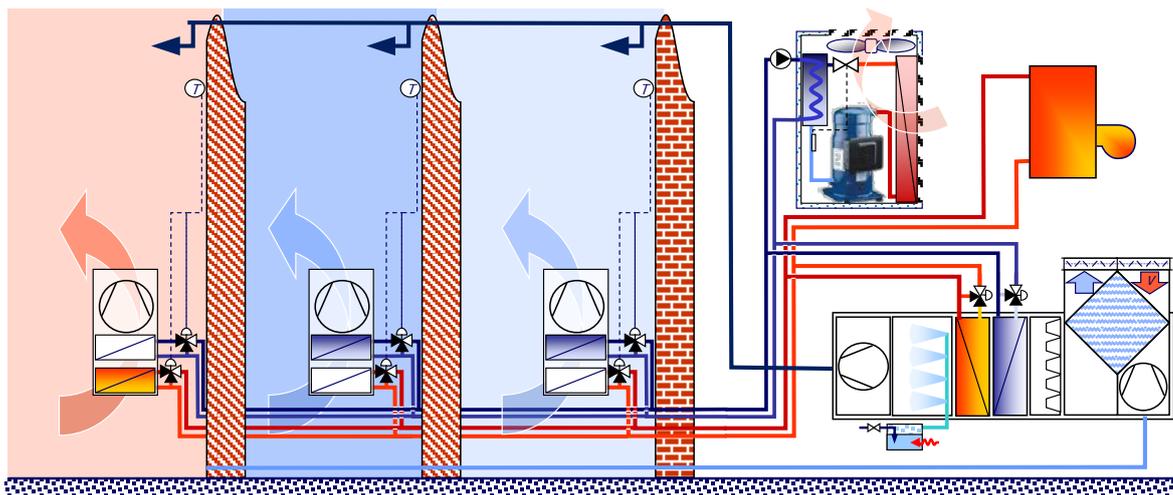


Fig. 4. Esquema de instalación Agua-Aire con climatizador de aire primario y recuperador

2.4. Influencia de la ventilación

2.4.1. Necesidad de ventilación

Las exigencias impuestas por el RITE [5], según la norma UNE-EN 13779, establecen una ventilación mínima para garantizar la calidad del aire interior. En el apartado RITE 1.1.4.2.2 se indica la calidad mínima de aire interior dependiendo del tipo de recinto y la actividad que se lleve a cabo. A efectos prácticos la determinación de la calidad de aire interior, y en consecuencia el caudal de ventilación, puede venir dada por:

- Nivel de CO₂
- Calidad de aire percibido
- Tasa de aire exterior por persona
- Tasa de aire exterior por unidad de superficie
- Niveles de concentración de contaminantes específicos

Una falta de ventilación puede llevar a un aumento de la concentración de CO₂, debida a la actividad metabólica desarrollada por las personas.

Según un informe del *Canadian Centre for Occupational Health and Safety* (1997) [48], la exposición a corto plazo de CO₂ a niveles por debajo del 2% (20.000 partes por millón o ppm) no ha reportado provocar efectos nocivos. Concentraciones más elevadas pueden afectar la función respiratoria y provocar excitación seguida por depresión del sistema nervioso central. Altas concentraciones de CO₂ pueden desplazar oxígeno en el aire, resultando, en concentraciones de oxígeno menores para la respiración. Por lo tanto, los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden combinarse con efectos de toxicidad de CO₂.

Los voluntarios expuestos a 3,3% o 5,4% de CO₂ durante 15 minutos experimentaron

profundidad aumentada de respiración. A 7,5%, una sensación de inhabilidad para respirar (disnea), ritmo aumentado del polvo, cansancio, mareos, sudor, fatiga, desorientación y distorsión visual desarrollada. 20 minutos de exposición a 6,5 o 7,5% hicieron disminuir el rendimiento mental. Se reportó irritabilidad y malestar con exposiciones a 6,5% por aproximadamente 70 minutos. Exposición a 6% por varios minutos, o 30% por 20-30 segundos, afectaron el corazón, según se muestran en los electrocardiogramas alterados.

2.4.2. Cargas de ventilación

El aire de ventilación conlleva unas cargas térmicas que, dependiendo de la situación, pueden representar un gran porcentaje de las totales, como se ha podido comprobar en el ejemplo expuesto anteriormente. Estas cargas dependen de las condiciones exteriores y las interiores y vienen dadas por:

$$q_{vent} = \frac{Q_{vent}}{V_{esp}} \cdot (h_{ext} - h_{int}) \quad \text{ec. 1}$$

Esta carga se separa entre sensible, responsable de la variación de temperatura, y latente, responsable de la variación de humedad,

$$q_{vent} = q_{vent s} + q_{vent l} \quad \text{ec. 2}$$

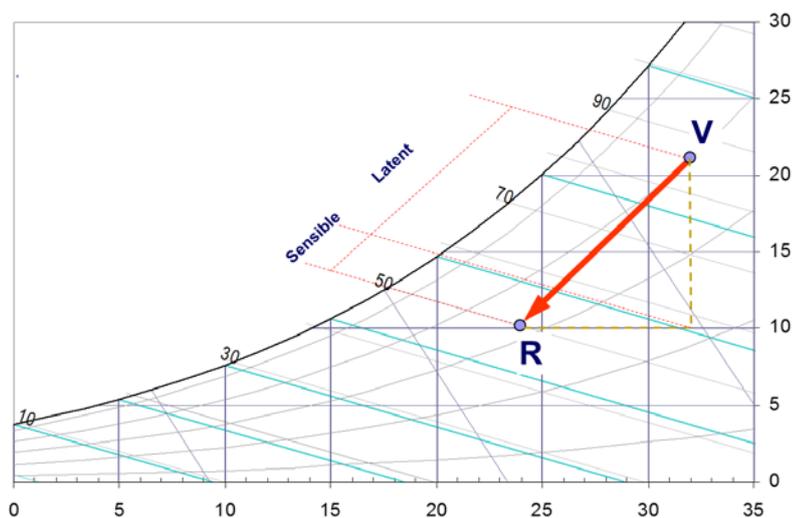


Fig. 5. Representación de las cargas de ventilación en el diagrama psicrométrico

2.5. Sistemas de ahorro energético en instalaciones de climatización

2.5.1. Free cooling

El sistema de “free-cooling” o enfriamiento gratuito consiste en parar el sistema de producción de frío y coger todo el aire del exterior cuando las condiciones exteriores sean más favorables que las del local. Es decir, se ventila mediante la apertura de la compuerta de aire exterior de la caja de mezcla del climatizador. Existen 2 tipos de “free-cooling”, sensible y entálpico. En el primero de ellos únicamente se comparan las temperaturas entre el interior y el exterior; en el segundo, además, se compara la humedad.

Con este sistema se intentan combatir las cargas internas del local a acondicionar.

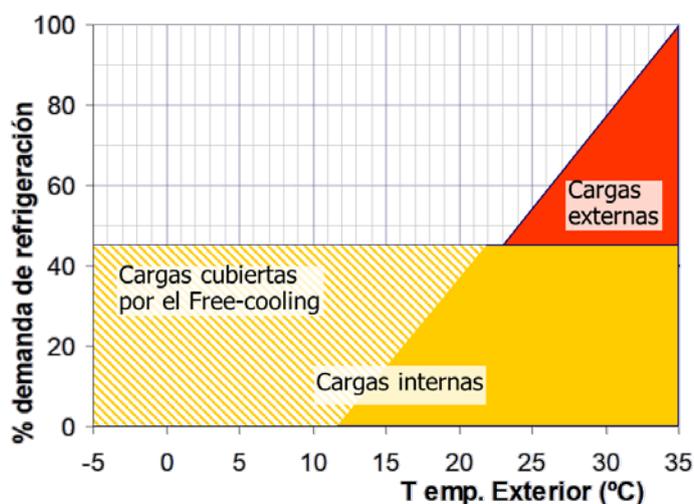


Fig. 6. Perfil de cargas cubiertas por el free-cooling

En la siguiente figura se muestra el proceso más habitual para poder realizar el “free-cooling”. El sistema cuenta con un ventilador en la línea de retorno que puede canalizar el aire prominente de la sala hacia el exterior o bien recircularlo hacia la batería de enfriamiento. La proporción de aire expulsado y recirculado se realiza mediante un juego de compuertas en base a su grado de apertura o cierre. Una tercera compuerta en la entrada del aire exterior opera, sincronizadamente, con el aire expulsado al exterior y, de esta forma, en aumentar el caudal de aire exterior, a medida que la compuerta se abre, se va cerrando la del aire recirculado y se abre la de aire expulsado.

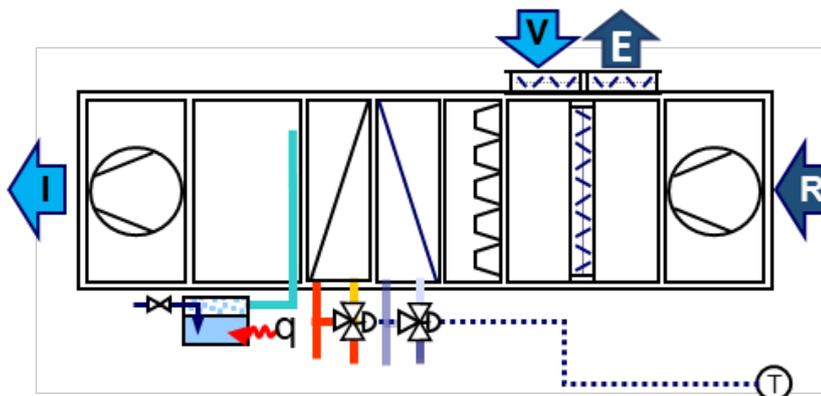


Fig. 7. Climatizador en modo "Free-cooling"

En el RITE, en su IT 1.2.4.5.1, este sistema es obligado para sistemas o subsistemas de más de 70 kW de potencia frigorífica.

2.5.1.1. Free-cooling sensible

Según la normativa, en general, la aportación de aire exterior ha de basarse en la comparación entálpica entre el aire de retorno y el aire exterior. Aun así, en climas secos o locales donde se admitan humedades relativas superiores a los valores normales, será suficiente comparar temperaturas.

Se pueden plantear los siguientes casos:

- $T_o < T_{imp}$: *Free-cooling total*
- $T_i > T_o > T_{imp}$: *Free-cooling parcial*
- $T_i < T_o$: *Planta enfriadora*

Y la resolución de cada uno de ellos vendría dado según se expone en la siguiente figura:

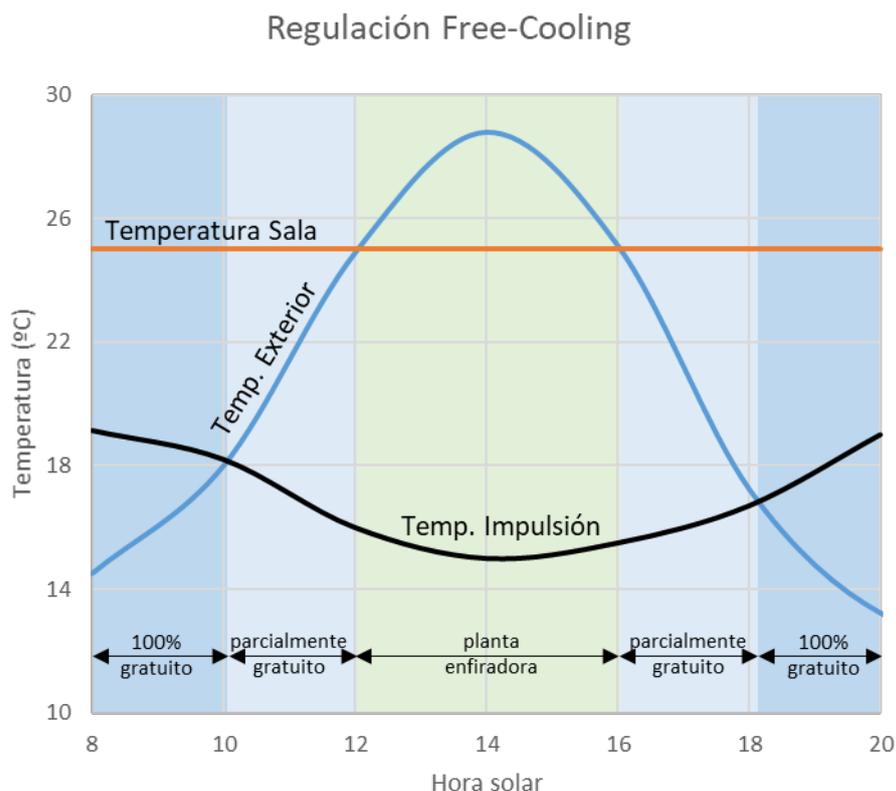


Fig. 8. Gráfico de regulación del free-cooling sensible con caudal de impulsión constante

2.5.1.2. Free-cooling entálpico

A diferencia del free-cooling sensible en el que únicamente se comparan las temperaturas del local con la exterior, en éste se comparan las entalpías, en base a medir tanto las temperaturas como las humedades. Si la entalpía del aire exterior es favorable, es decir, más baja que la entalpía del aire de retorno, en el caso de verano, se aprovechará la ventilación para enfriar el local.

También nos podemos encontrar con una serie de casos:

- $h_o < h_{imp}$: free-cooling total
- $h_i > h_o > h_{imp}$: free-cooling parcial
- $h_i < h_o$: Planta enfriadora

2.5.2. Recuperación de calor del aire de extracción

Los recuperadores de calor son dispositivos que llevan muchos años utilizándose a nivel industrial, pero es desde que se ha tomado consciencia de la importancia del ahorro energético y el impacto medioambiental que han empezado a introducirse en el sector de la climatización de confort.

Son múltiples los factores que inciden en la elección del mejor recuperador de calor para una instalación concreta. Una mala elección puede representar que este ahorro que se prevé obtener no sea tan notable como se deseaba.

Los factores que mayor influencia pueden ejercer sobre el comportamiento global del sistema pueden ser: la tipología de recuperador (sensible o entálpico); climatología del entorno donde se vaya a realizar la instalación; la relación entre la carga de ventilación y la carga total a cubrir; los horarios y horas de funcionamiento; etc...

2.5.2.1. Importancia y normativa

Con el uso de un recuperador de calor en el sistema de ventilación se consigue reducir de forma notable esta carga, intercambiando calor entre el aire de extracción (o aire viciado) y el aire fresco procedente del exterior que nos permitirá mantener unas condiciones óptimas de salubridad y confort.

El RITE, a la su IT 2.4.5.2, exige la instalación de recuperadores de calor cuando el caudal de aire expulsado al exterior, por medios mecánicos, sea superior a los 0,5 m³/s (1800 m³/h). Adicionalmente, la norma indica que, para aumentar la eficiencia de la recuperación, se dispondrá de un equipo de enfriamiento adiabático sobre el aire extraído.

Dicha normativa también establece las eficiencias mínimas que deben cumplir estos recuperadores, así como la pérdida de carga máxima admisible en base a sus horas de funcionamiento, según se indica en la tabla siguiente:

| Horas anuales de funcionamiento | Caudal de aire exterior (m ³ /s) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|-----|-------------|-----|-------------|-----|------------|-----|------|-----|
| | > 0,5...1,5 | | > 1,5...3,0 | | > 3,0...6,0 | | > 6,0...12 | | > 12 | |
| | % | Pa | % | Pa | % | Pa | % | Pa | % | Pa |
| ≤ 2.000 | 40 | 100 | 44 | 120 | 47 | 140 | 55 | 160 | 60 | 180 |
| > 2.000...4.000 | 44 | 140 | 47 | 160 | 52 | 180 | 58 | 200 | 64 | 220 |
| > 4.000...6.000 | 47 | 160 | 50 | 180 | 55 | 200 | 64 | 220 | 70 | 240 |
| > 6.000 | 50 | 180 | 55 | 200 | 60 | 220 | 70 | 240 | 75 | 260 |

Tabla 3. Caudales de aire exterior (Tabla 2.4.5.1 del RITE)

Si bien es cierto que en determinadas ocasiones el equipo de enfriamiento adiabático puede mejorar la recuperación de calor, esto ocurre en muy determinadas ocasiones y, en cambio, este sistema introduce más puntos negativos (pérdidas de carga adicionales, posibles problemas de legionela, etc...) que ventajas, con lo que no se contemplará en este estudio.

2.5.2.2. Tipos de recuperadores

Los recuperadores de calor se pueden clasificar según sus características constructivas o bien según el intercambio de calor que realicen.

A nivel constructivo podemos encontrar recuperadores de tipo estático o bien rotativo; y en base al intercambio de calor que realicen, podemos encontrar de sensibles (HRV) o bien entálpicos (ERV).

En los de tipo sensible únicamente se produce transmisión de calor debido a la diferencia de temperatura entre el aire interior y el de ventilación; en cambio, los de tipo entálpico permiten recuperar también parte del vapor de agua de un flujo de aire a otro, gracias a la permeabilidad de la pared de intercambio.

- *Recuperadores estáticos:*

Los recuperadores estáticos presentan unas características constructivas que, de forma genérica, son del tipo placas con aletas flujo cruzado, usual en los intercambiadores gas-gas.

Los recuperadores estáticos sensibles utilizan normalmente un metal (aluminio, acero inoxidable), como elemento constructivo para la transferencia de calor.

En la Fig. 9, se presentan dos esquemas constructivos y operativos de dicho tipo de recuperadores.

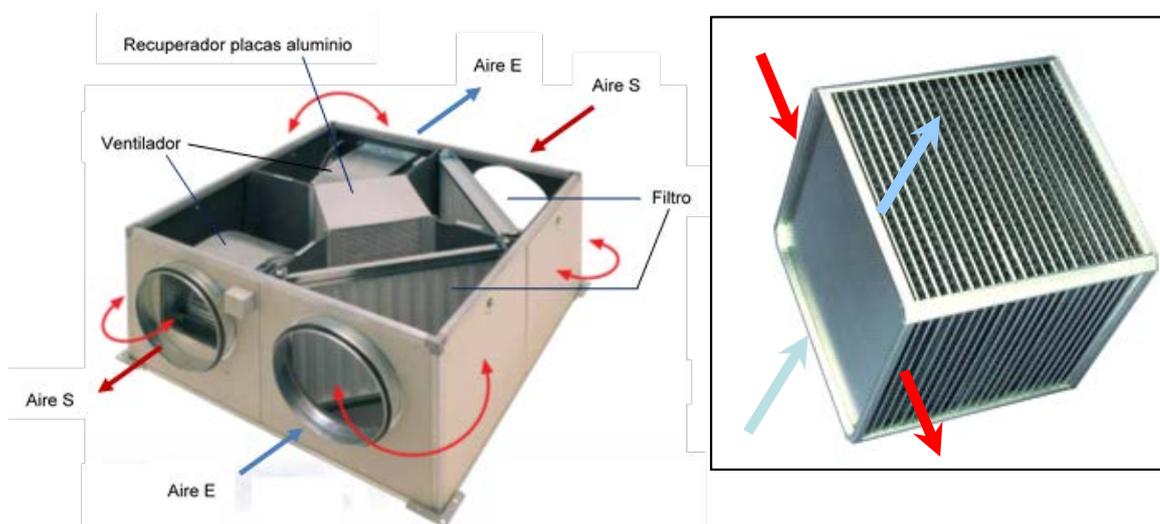


Fig. 9. Cuerpo y recuperador estático sensible (Soler & Palau / Sodeca)

Los recuperadores estáticos entálpicos utilizan un material que permite la transferencia de calor y humedad entre los flujos de aire, existiendo dos grandes tipos, en función del material utilizado:

- Placas de celulosa con tratamiento químico
- Membranas de polímeros

Estos materiales presentan un cierto nivel de porosidad para permitir la transferencia de calor y la transferencia selectiva de vapor de agua entre ambos flujos de aire, minimizando la migración de otro tipo de gases (CO₂, VOC).

En la Fig. 10 se presenta un esquema del mecanismo de transferencia de calor y masa en dicho tipo de recuperadores.

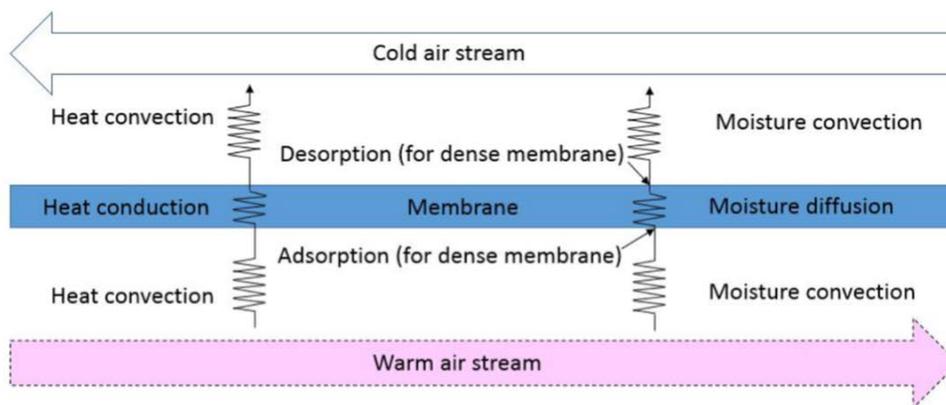


Fig. 10. Esquema del mecanismo de transferencia de calor y masa en un recuperador entálpico tipo membrana (Ref: Liu et al [28])

En la Fig. 11 se presentan dos esquemas constructivos y operativos de un recuperador entálpico de placas de celulosa.

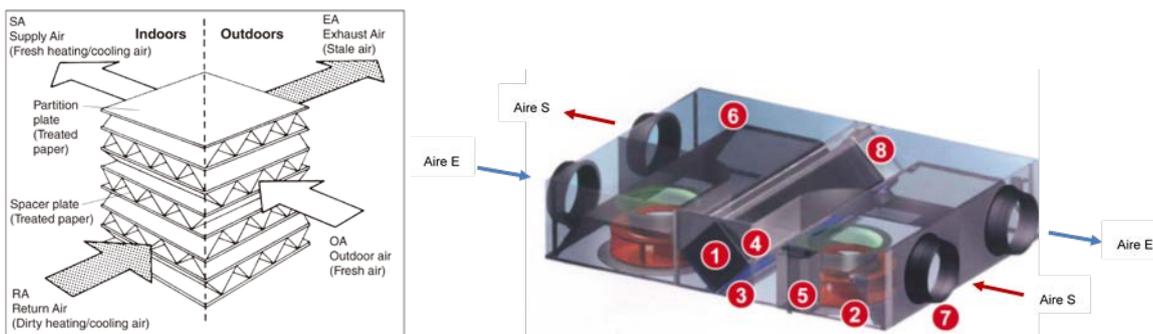


Fig. 11. Cuerpo y recuperador estático entálpico de placas de celulosa (Mitsubishi / Hitachi)

- *Recuperadores rotativos:*

Los recuperadores rotativos presentan unas características constructivas y operativas, diferentes de los recuperadores estáticos, pero permiten realizar el mismo tipo de función.

Los recuperadores sensibles incorporan un cuerpo de sección circular, constituido por una matriz o malla metálica (aluminio, acero inoxidable), que permite el paso del aire.

Este cuerpo presenta una velocidad de rotación regulable, usualmente entre 5 y 20 rpm, mediante un motor eléctrico.

Por el semicírculo superior circula, por ejemplo, el flujo de aire interior y por el semicírculo inferior circula el aire exterior. Suponiendo el modo de funcionamiento en invierno (Fig. 12), el aire interior a su paso por la malla cede el calor a dicha malla, elevando su temperatura. En su proceso de rotación dicha malla, en su paso por la parte inferior, entrará en contacto con el aire exterior frío, cediendo el calor a dicho aire.

El proceso simplificado de transmisión de calor es:

Aire caliente → Malla metálica → Aire frío

Este tipo de recuperadores presentan generalmente una eficiencia de transmisión de calor superior a los estáticos y permiten hacer circular caudales de aire superiores. La desventaja básica es que son equipos constructivamente más complejos y caros, con un mantenimiento superior.

En la Fig. 12 se presentan dos esquemas constructivos y operativos de un recuperador rotativo sensible.

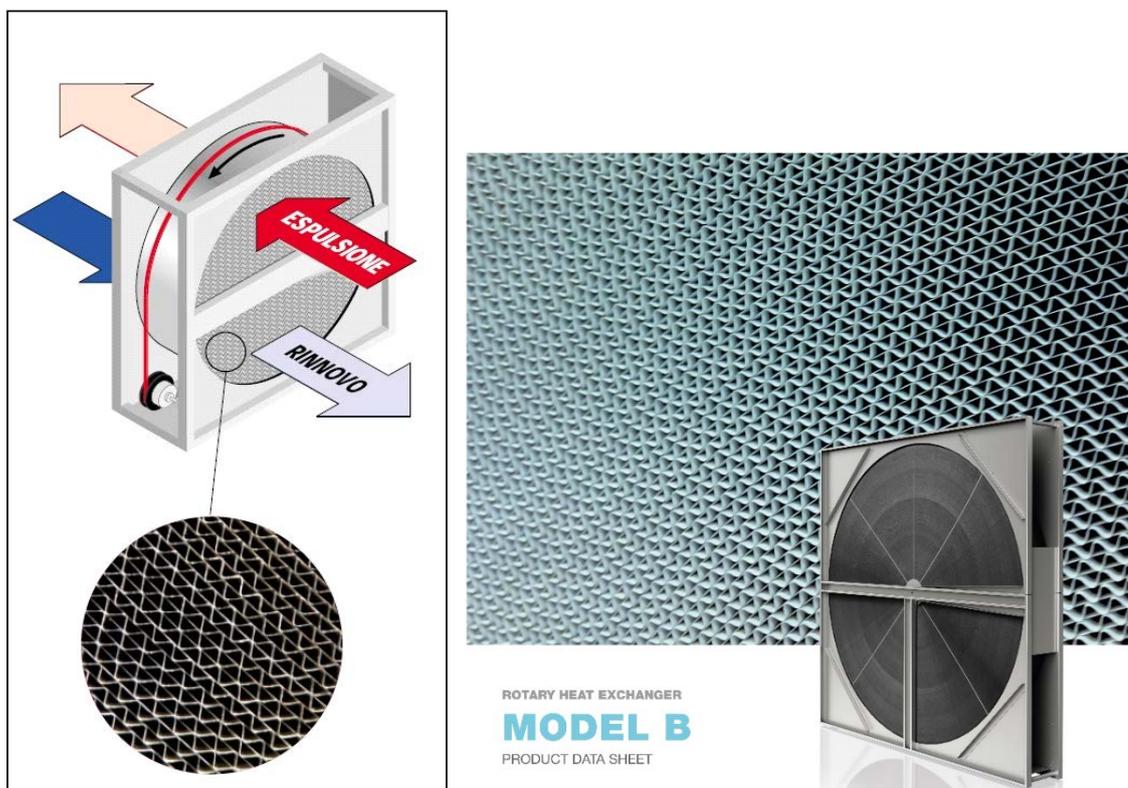


Fig. 12. Recuperador de calor sensible aire-aire tipo rotativo (Sodeca / Heatex)

Los recuperadores entálpicos son constructivamente similares a los estáticos, pero difieren en el tipo de material utilizado para construir el cuerpo o malla del equipo.

Normalmente se utiliza un material que permite la transferencia de calor y masa (vapor de agua), constituido por dos componentes:

- Sustrato: Aluminio, acero inoxidable, polímeros
- Recubrimiento: Gel de sílice, tamiz molecular, alúmina activada

Los materiales utilizados para el recubrimiento son compuestos con una gran afinidad por las moléculas de agua. Realizan un proceso de adsorción del vapor de agua presente en el aire húmedo y posteriormente un proceso de desorción y transferencia del vapor de agua al aire más seco.

De forma resumida, la transferencia de calor se realiza a través del sustrato y la transferencia de masa (vapor de agua) a través del recubrimiento.

En ocasiones, las características del edificio o local aconsejan un trazado de conductos de aire de ventilación y de extracción que supone que la ubicación de ambos no sea cercana, en este caso, lógicamente, no puede utilizarse un recuperador como los mostrados al no coincidir ambas corrientes de aire.

En estos casos lo que procede es utilizar un fluido caloportador para realizar el intercambio. Habitualmente se emplea un circuito cerrado de agua y una batería de intercambio en cada uno de los caudales de aire, de esta manera el agua que se calienta en una de las baterías absorbiendo la energía del aire que por ella circula, lleva ésta y posteriormente la cede al aire en la otra.

No obstante, en la medida de lo posible conviene evitar este sistema de recuperación aire-agua-aire, en favor de los recuperadores aire-aire pues la eficacia de aquellos puede ser incluso inferior a la mitad que la de estos últimos.

La tabla siguiente muestra diferentes tipologías de recuperadores, clasificados en base a los criterios descritos anteriormente:

| VARIABLE | ESTÁTICO (PLACAS) | | ROTATIVO | |
|---------------------------------------|---|---|--|---|
| | SENSIBLE | ENTÁLPICO | SENSIBLE | ENTÁLPICO |
| Especificaciones constructivas | Aluminio (placas con aletas) | Placa de celulosa con tratamiento químico Membranas de polímeros (permeabilidad selectiva al vapor de agua) | Malla o matriz metálica (aluminio, acero inox) | Sustrato: Aluminio, acero inox, polímeros Recubrimiento: Material adsorbente (vapor de agua) sílica gel, tamiz molecular, alumina activada |
| Eficiencia sensible | 50 - 75 % | 55 - 75 % | 65 - 80 % | 65 - 80 % |
| Eficiencia latente | 0 | 25 - 60 % | 0 | 50 - 80 % |
| Caudal de aire | 200 - 30.000 m ³ /h | 500 - 2.000 m ³ /h | 500 - 200.000 m ³ /h | 500 - 200.000 m ³ /h |
| Nivel fugas de aire | < 1 % | 0 - 5 % | 1 - 10 % | 1 - 10 % |
| Veloc frontal aire | 1 a 5 m/s | 1 a 3 m/s | 2 a 5 m/s | 2,5 m/s |
| Pérdida carga | 100 a 1000 Pa | 100 a 500 Pa | 100 a 300 Pa | 100 a 300 Pa |
| Ventajas | Simplicidad constructiva Sin partes móviles Facilidad de limpieza Bajo coste | Similar a sensible, pero con mayor dificultad de limpieza | Equipo compacto Diámetro: 0,5 a 5 m Veloc rotación: 5 a 20 rpm Elevada eficiencia Baja pérdida de carga Facilidad de limpieza | Similar a sensible, pero con mayor dificultad de limpieza |
| Limitaciones | Limitado a bajos y medios caudales (Tamaño y coste excesivo para grandes caudales) | Limitado a bajos caudales Tiempo de vida limitado (10 años aprox) | Nivel de fugas de aire apreciable No recomendable para locales con elevada exigencia de calidad de aire | Similar a sensible Tiempo de vida limitado (10 años aprox) |

Tabla 4. Comparativa y características de diferentes tipologías de recuperadores de calor

2.5.2.3. Eficiencia de los recuperadores

El esquema básico de los dos tipos de recuperadores de calor (HRV y ERV) considerados se resume en la Fig. 13.

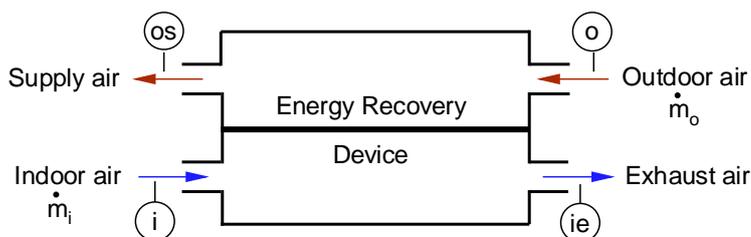


Fig. 13 Representación esquemática de un recuperador (HRV o ERV)

El HRV permite la recuperación de calor sensible entre el aire interior de ventilación (*i*: indoor air) y el aire exterior (*o*: outdoor air), el cual pasará a tener unas condiciones más favorables (*os*: supply air).

La Fig. 14 muestra un proceso genérico de transferencia de calor sensible en un HRV, y considerando que los caudales máscicos de aire exterior (m_o) y de aire interior de extracción (m_i) son iguales, la eficiencia sensible ε_s del recuperador puede calcularse como:

$$\varepsilon_s = \frac{q_s}{q_{smax}} \cong \frac{T_o - T_{os}}{T_o - T_i} = \frac{\Delta T_o}{\Delta T_{max}} \quad \text{ec. 3}$$

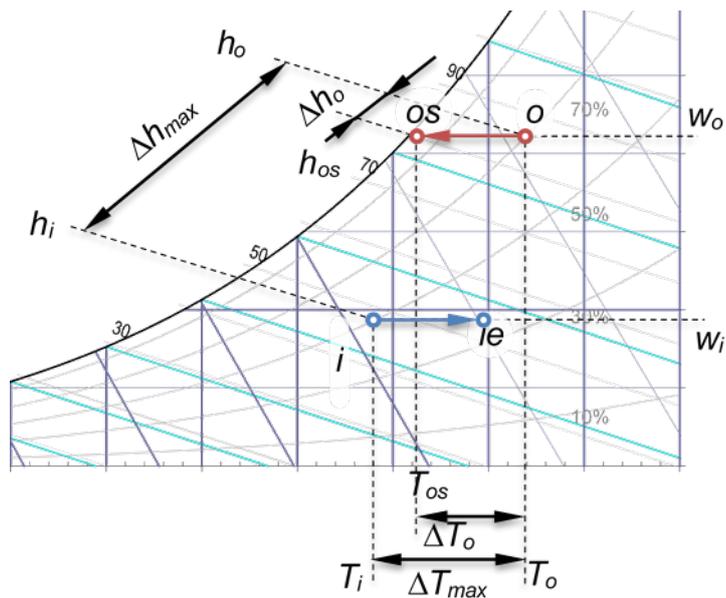


Fig. 14 Proceso de transferencia de calor sensible en un HRV sobre el diagrama psicrométrico (modo refrigeración)

La Fig. 15 muestra el proceso genérico de transferencia de calor y humedad en un recuperador entálpico ERV, y dado que éstos también permiten recuperar calor latente (humedad), su nivel de transferencia de energía puede cuantificarse, además de por la ya definida eficiencia sensible ε_s , por la eficiencia latente ε_l y por la eficiencia total ε_t .

Eficiencia latente

$$\varepsilon_l = \frac{q_l}{q_{lmax}} \cong \frac{w_o - w_{os}}{w_o - w_i} = \frac{\Delta w_o}{\Delta w_{max}} \tag{ec. 4}$$

Eficiencia total

$$\varepsilon_t = \frac{q_t}{q_{tmax}} = \frac{h_o - h_{os}}{h_o - h_i} = \frac{\Delta h_o}{\Delta h_{max}} \tag{ec. 5}$$

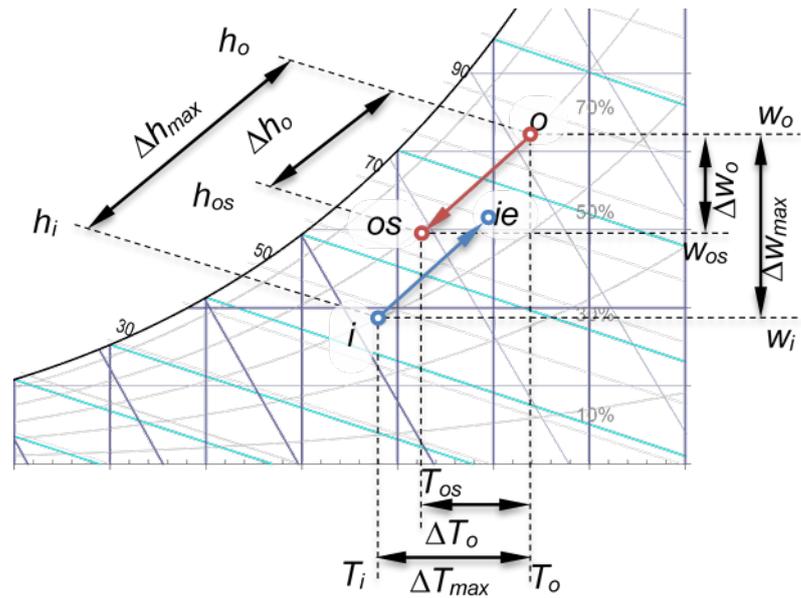


Fig. 15 Proceso de transferencia de calor sensible y latente en un ERV sobre el diagrama psicrométrico (modo refrigeración)

Aunque los valores de estas eficiencias pueden coincidir, en general no tienen por qué hacerlo (en este ejemplo $\varepsilon_s > \varepsilon_i > \varepsilon_l$). Los HRV y ERV utilizados en sistemas de ventilación, presentan eficiencias que pueden situarse entre el 50 y el 80 %, ver Besant & Simonson [34] y ASHRAE Systems and Equipment [9].



3. Metodología de estudio

3.1. Influencia de los recuperadores sobre la instalación

En cualquier instalación, cuando se le introduce un nuevo elemento, ésta se ve alterada. Y no es una excepción cuando se introducen los recuperadores de calor en una instalación de climatización.

Aunque generalmente estas perturbaciones tienen poco efecto respecto a la aportación que hacen los recuperadores, no está de más exponerlas.

Estas perturbaciones las podemos considerar de tipo directo, es decir, por el hecho de haber introducido este nuevo elemento en la instalación ésta se ve alterada; o bien de tipo indirecto, es decir, que, debido al funcionamiento de estos recuperadores, la instalación modifica su comportamiento.

En las perturbaciones de tipo directo encontramos, básicamente, la pérdida de carga introducida por el recuperador y los filtros.

En las de tipo indirecto encontramos, básicamente, la modificación del punto de funcionamiento de la planta enfriadora debido al cambio de propiedades que sufre el aire al pasar por el recuperador de calor.

3.1.1. Influencia directa del recuperador de calor

3.1.1.1. Pérdidas de carga en el recuperador

Todo intercambiador de calor tiene asociadas unas pérdidas de carga que dependen de muchos factores, pero éstas siempre serán proporcionales al cuadrado del caudal volumétrico que circula por él. En la figura siguiente se pone de manifiesto esta proporcionalidad para un ejemplo de equipo determinado.

$$\Delta P = a \cdot Q^2$$

ec. 6

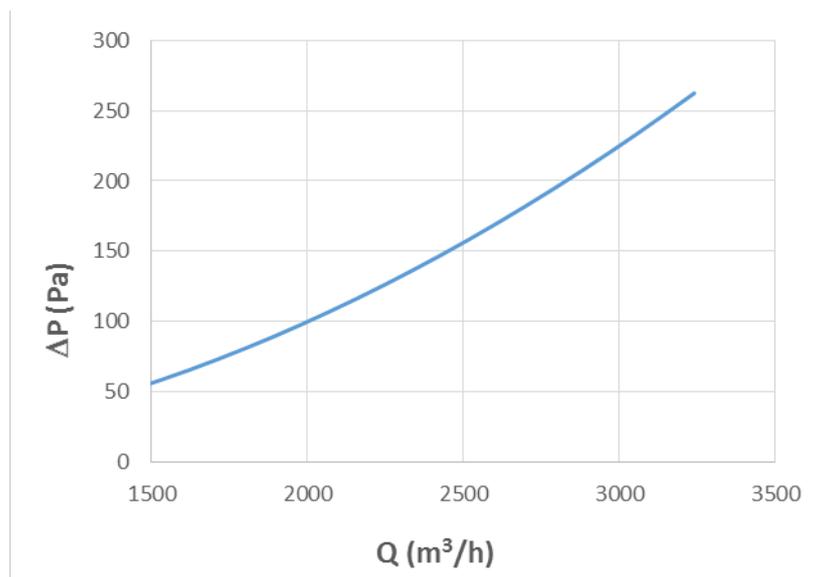


Fig. 16. Pérdida de carga en un recuperador tipo

Según se ha comentado con anterioridad, y como indica la normativa, hay una pérdida de carga máxima admisible en el recuperador en base al caudal de aire que intercambie y las horas de funcionamiento [5].

3.1.1.2. Pérdidas de carga en los filtros

Con el fin de proteger al recuperador de calor e impedir que su eficiencia de intercambio se vea reducida por la suciedad que se pueda depositar sobre él, se deben colocar filtros en ambas corrientes de aire, tanto en la aportación como en la extracción. La incorporación de estos filtros conlleva a introducir una pérdida de carga adicional que dependerá del tipo de filtro y del caudal de aire que circule.

3.1.2. Influencia indirecta del recuperador de calor

En el caso que se tenga un sistema todo-aire, es decir, que un único climatizador permita tratar las cargas internas y las de ventilación, nos encontramos en que, para poder mantener las condiciones interiores de temperatura y humedad, las condiciones de impulsión del aire vendrán fijadas, siempre que el caudal de aire sea constante.

Por lo tanto, si las condiciones que debe tener el aire de impulsión quedan fijadas por las condiciones interiores que se requieran y de las cargas internas a cubrir (depende del FCS_i ¹), la temperatura de rocío de la batería (o temperatura de superficie) vendrá condicionada por el FCS_t . El FCS_t varía en función de las condiciones del aire exterior, tal como se muestra en la siguiente:

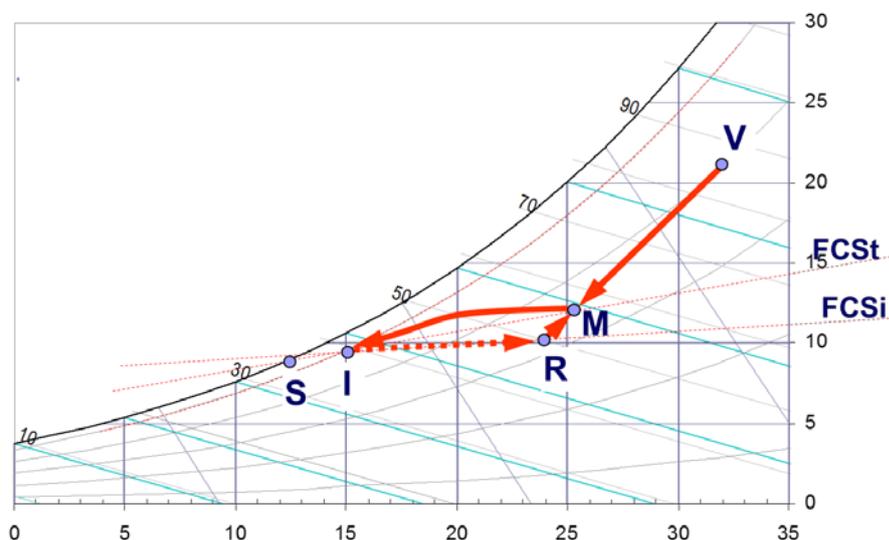


Fig. 17. Representación de la influencia de la recuperación de calor sobre la temperatura de superficie

Es en este punto donde el recuperador de calor interacciona con el resto del sistema. En función de la tipología de recuperador que se escoja, las condiciones del aire de ventilación, al pasar por el recuperador, variarán y, por lo tanto, también lo hará la temperatura de superficie de la batería. Al modificarse esta temperatura se verán modificadas las condiciones de trabajo de la planta enfriadora, variando su temperatura de evaporación. Este cambio en las condiciones de trabajo y, sobretodo, la disminución de la temperatura de evaporación conllevan que el COP del equipo frigorífico sea menor, tal y como se muestra en el siguiente gráfico:

¹ FCS_i o FCS_t : Representan la relación entre la carga sensible y la carga total a combatir, ya sea a nivel de cargas internas o internas + ventilación.

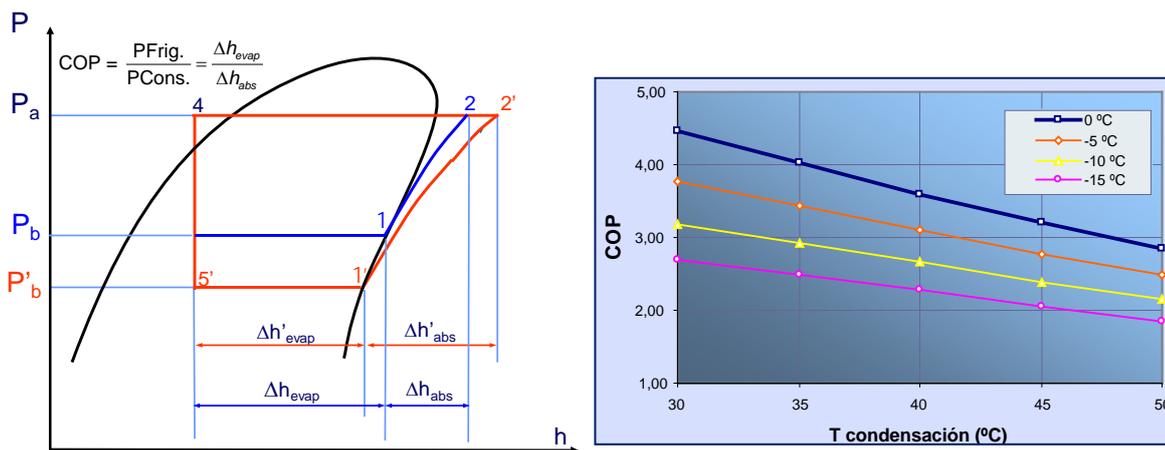


Fig. 18. Influencia de la temperatura de evaporación sobre las prestaciones del equipo frigorífico

Esta variación de la temperatura de superficie será diferente en función del tipo de recuperador escogido (ERV, HRV).

El gráfico siguiente muestra como varía el FCS_t , y por lo tanto la temperatura de superficie de la batería, en función de la tipología de recuperador que se utilice. Los puntos V' , M' i T' corresponden al caso de los HRV, mientras que los puntos V'' , M'' i T'' corresponden al ERV.

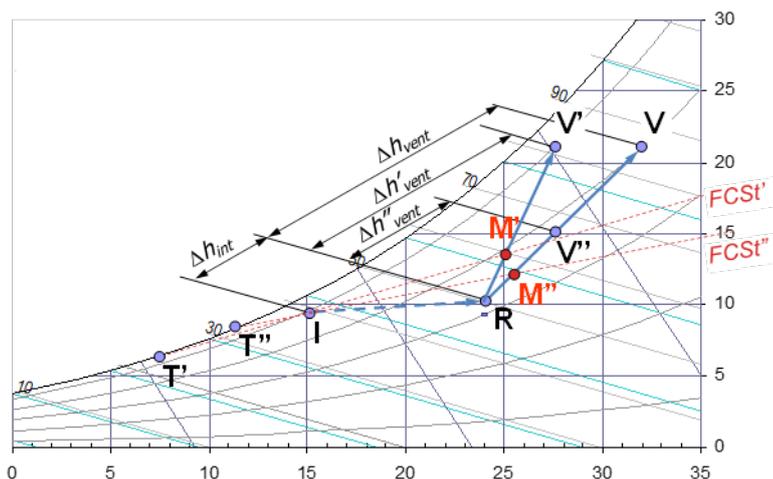


Fig. 19. Variación de la temperatura de superficie en función de la tipología de recuperador

En el caso de los HRV, al no haber una disminución de la humedad absoluta, el FCS_t siempre será menor que si no se dispone de éste, con lo que la temperatura de la superficie de la batería disminuirá, con la consecuente reducción del COP del equipo frigorífico.

Si pasamos a analizar el comportamiento de los recuperadores de tipo entálpico podemos encontrarnos en diversas situaciones:

1. Que de forma porcentual se recupere la misma cantidad de calor sensible que latente ($\varepsilon_s = \varepsilon_l$), y por lo tanto el punto de mezcla se encontrará sobre la línea de unión entre el punto de las condiciones interiores y las exteriores, obteniendo un FCS_i más favorable.

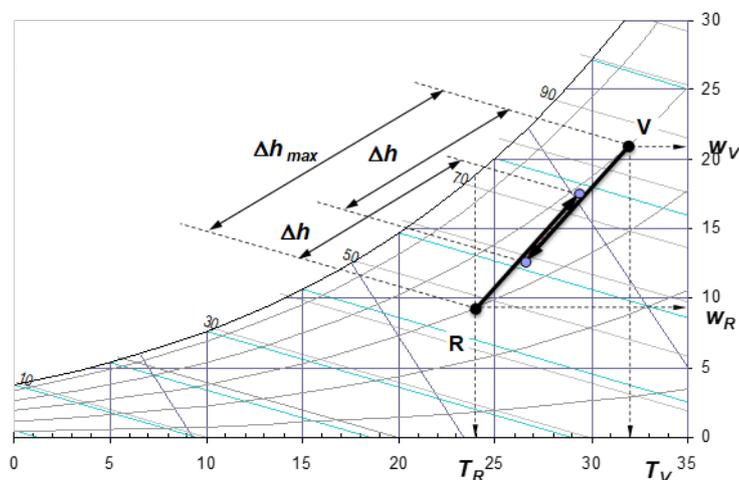


Fig. 20. Recuperación de cantidades porcentuales iguales de calor sensible i latente

2. Que de forma porcentual se recupera mayor cantidad de calor sensible que de latente y, por lo tanto, el punto de mezcla se encontrará por encima de la línea de unión entre el punto de las condiciones interiores y las exteriores, obteniendo un FCS_i no tan favorable como se desearía.

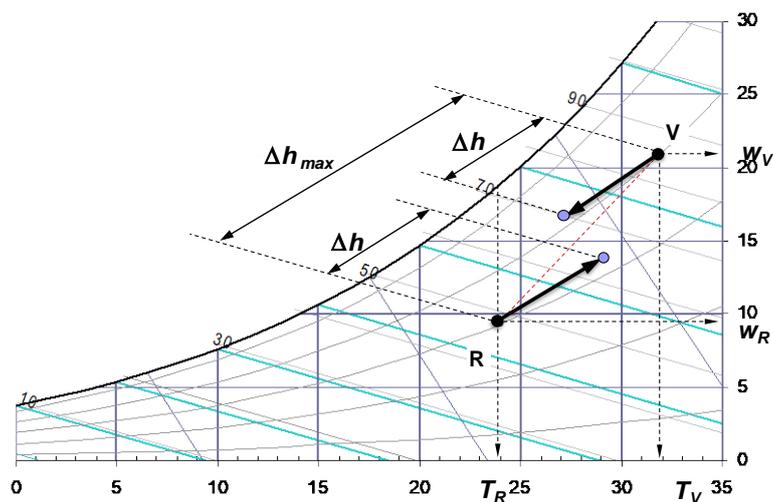


Fig. 21. Mayor recuperación de calor sensible que latente

3. Que de forma porcentual se recupere menor cantidad de calor sensible que de latente y, por lo tanto, el punto de mezcla se encontrará por debajo de la línea de unión entre

el punto de las condiciones interiores y las exteriores, obteniendo un FCS_t aún más favorable. Cabe destacar que esta no es una situación habitual.

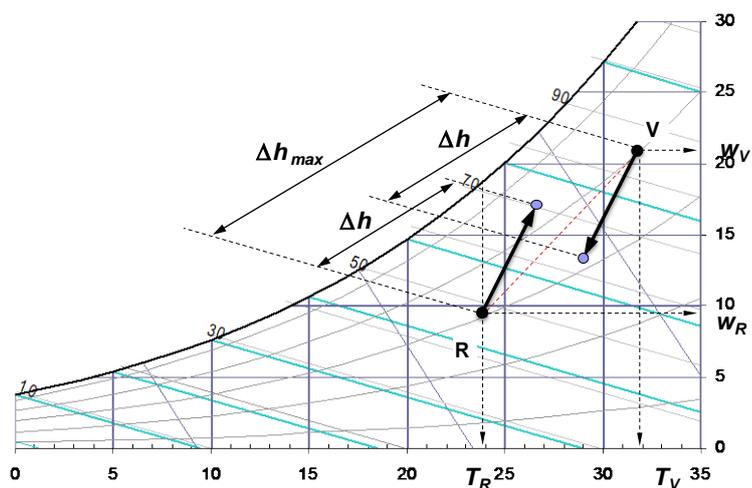


Fig. 22. Mayor recuperación de calor latente que sensible

Se puede deducir que, en la mayoría de las condiciones de trabajo que se tengan, el FCS_t que se obtiene después del punto de mezcla, siempre estará por encima con el uso de los ERV respecto los HRV, con lo que la afectación de éstos sobre la instalación será mayor.

3.2. Consideraciones (hielo, condensación, eficiencia variable, ...)

3.2.1. Eficiencia variable del recuperador de calor

De forma genérica, al aumentar el caudal de aire, aumenta la eficiencia de un recuperador, pero también se incrementa la pérdida de carga del aire. Esto provoca un aumento del consumo eléctrico de ventiladores. Este incremento energético debe tenerse en cuenta, de cara al balance global de ahorro energético que supone la utilización de recuperadores en el proceso de ventilación.

El diseño óptimo de un recuperador debe perseguir máxima eficiencia con una pérdida de carga aceptable. Dicha pérdida de carga está usualmente comprendida entre 100 y 300 Pa.

A nivel general, deben destacarse los siguientes aspectos genéricos (ver Tabla 4):

- En los recuperadores entálpicos, la eficiencia sensible y latente acostumbran a no ser iguales. En general la eficiencia sensible es superior a la latente.
- La eficiencia sensible y latente de los recuperadores rotativos es sensiblemente superior a las eficiencias de los recuperadores estáticos.

- La eficiencia sensible no varía de forma apreciable, al variar la temperatura y humedad del aire exterior (caudal de aire constante).
- La eficiencia latente disminuye al aumentar la temperatura del aire exterior y aumenta al incrementarse la humedad del aire exterior.

Estas variaciones dependen del tipo de recuperador entálpico y de sus condiciones de operación. Según Woods [11], la eficiencia latente de un recuperador entálpico de membrana puede incrementarse un 7%, al aumentar la humedad relativa del aire en un 70%.

3.2.2. Condensación y formación de hielo

Durante la época de verano, bajo ciertas condiciones climáticas del aire exterior, curiosamente con los HRV, nos podemos llegar a encontrar en la situación que no únicamente permitan introducir el aire exterior a una menor temperatura, sino que éste puede llegar a condensar parte de la humedad, debido a que la temperatura del aire exterior alcanza la temperatura de rocío, con lo que en este momento se estaría recuperando tanto calor sensible como latente.

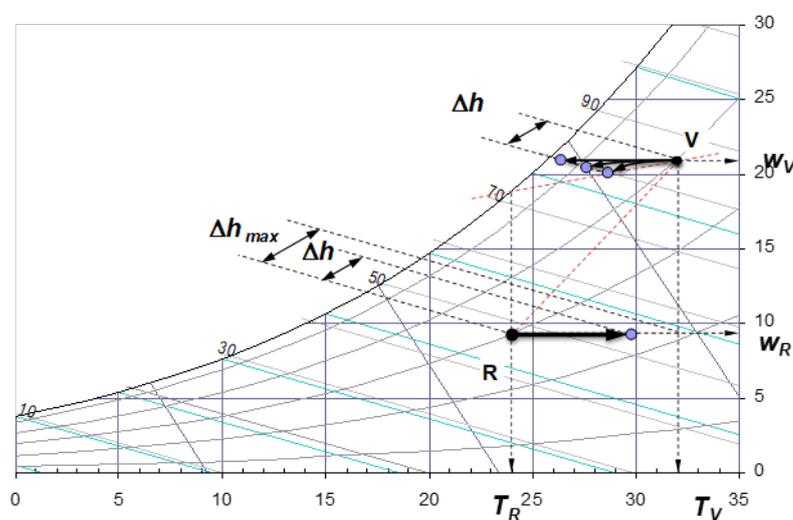


Fig. 23. Recuperación sensible con condensación

Durante el invierno, cuando el aire exterior alcanza temperaturas suficientemente bajas, puede presentarse el proceso de condensación de agua en los canales de circulación del aire interior a través del recuperador. Este fenómeno ocurre cuando la temperatura superficial del material del recuperador (metal, polímero), en contacto con el aire interior, alcanza valores inferiores a la temperatura de rocío de dicho aire.

Para minimizar los efectos de dicho proceso de condensación sobre el funcionamiento del recuperador (inundación, disminución de eficiencia), el recuperador debe incorporar un sistema de drenaje continuo del agua líquida formada.

Si la temperatura superficial del material del recuperador alcanza temperaturas inferiores a 0 °C, el vapor de agua condensará en forma de hielo, que queda adherido sobre la superficie de intercambio de calor (calor y masa) del recuperador. Este fenómeno es conocido con el nombre de *frosting*.

Al incrementarse progresivamente el espesor de la capa de hielo, las prestaciones del recuperador disminuyen de forma importante, debido a los siguientes procesos:

- Disminución de la sección de paso y del caudal de aire interior a través del recuperador Incremento de la pérdida de carga del aire interior a su paso por el recuperador
- Incremento de la resistencia térmica de transmisión de calor entre flujos de aire (disminución de la eficiencia sensible)
- Disminución de la transmisión de vapor de agua entre flujos de aire (disminución de la eficiencia latente)

Para evitar los efectos negativos del proceso de *frosting*, existen diversos sistemas, que serán comentados más adelante.

El fenómeno de formación de hielo no es tan sencillo de predecir exactamente, ya que depende de diferentes factores:

- Condiciones de temperatura y humedad del aire interior
- Condiciones de temperatura y humedad del aire exterior
- Caudal de aire
- Tipo de recuperador

Se han realizado diversos estudios, con el objetivo de predecir y cuantificar numéricamente y/o medir experimentalmente el proceso de formación de hielo en recuperadores. Entre dichos estudios deben destacarse los recientes trabajos de Liu et al. [28][27], Alonso et al. [15], Beattie et al.[35].

El análisis de dichos trabajos permite deducir que el proceso de formación de hielo se presenta para temperaturas límite del aire exterior, inferiores a 0 °C, cuyo valor es variable, en función del tipo de recuperador (ver Tabla 5).

| Tipo de recuperador | Variante | Tipo de flujo | Temperatura formación hielo | Sistema determinación temperatura |
|---------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Estático (placas) | Sensible | Cruzado (cross flow) | -3,5 a -5 °C | Experimental |
| | Entálpico (membrana) | Contracorriente (counter flow) | -8 °C | Teórico |
| Rotativo | Sensible | Contracorriente (counter flow) | -16 °C | Experimental |
| | Entálpico | Contracorriente (counter flow) | -25 a -29 °C | Experimental |

Tabla 5. Temperatura límite de formación de hielo

Los valores indicados en dicha tabla son orientativos, pero permiten deducir que los recuperadores rotativos presentan temperaturas límite inferiores a los estáticos. Es decir, presentan problemas operativos, debidos al *frosting*, a temperaturas más bajas.

En climas fríos, debe incorporarse al recuperador un sistema de eliminación del hielo formado en el equipo, para garantizar su correcto funcionamiento.

Actualmente los sistemas más utilizados son:

- 1) Precalentamiento del aire exterior de entrada al recuperador
- 2) Bypass del flujo de aire exterior
- 3) Utilización de recuperadores de doble cuerpo de intercambio de calor

El primer sistema utiliza un equipo de calentamiento del aire exterior (*preheater*) hasta una temperatura, suficientemente alta para evitar la formación de hielo. Esto permite mantener permanentemente operativo el recuperador y garantizar una buena calidad del aire interior. La gran desventaja es que presupone un consumo adicional de energía (*preheater*) y una disminución del calor sensible transferido o recuperado en el equipo.

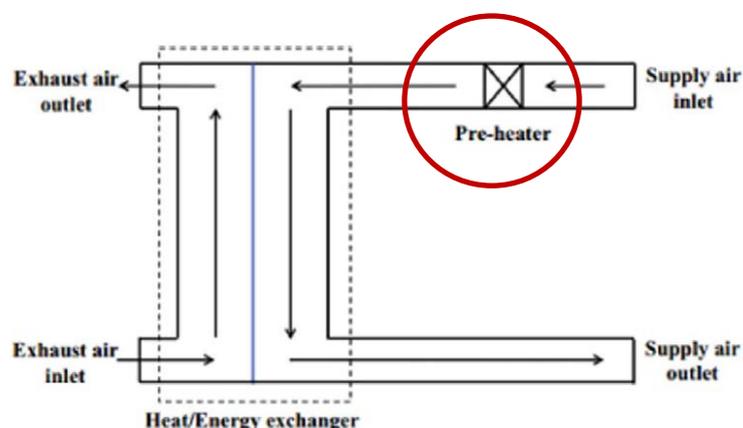


Fig. 24. Precalentamiento del aire exterior de entrada al recuperador

El segundo sistema incorpora en el recuperador unas compuertas (*bypass valves*) que permiten eliminar la alimentación de aire exterior al equipo. La recirculación del aire interior por el recuperador permite la eliminación progresiva del hielo formado. Este sistema presenta la ventaja que no requiere un consumo adicional de energía en el recuperador. La desventaja es que, durante la fase de deshielo, el sistema de ventilación no está operativo, afectando a la calidad del aire interior del local.

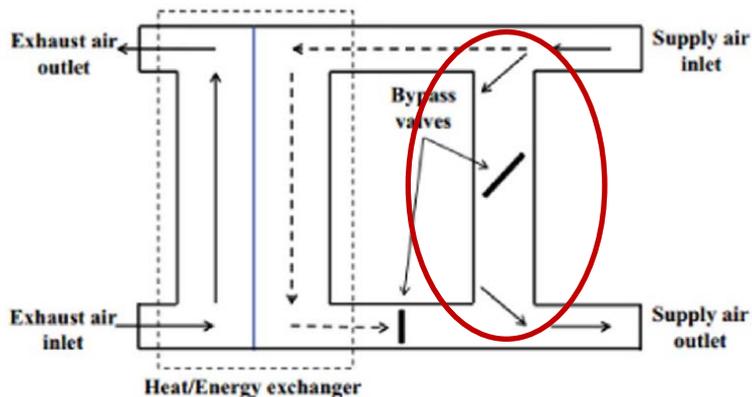


Fig. 25. Bypass del flujo de aire exterior

El tercer sistema incorpora un recuperador de doble cuerpo de intercambio de calor. Mientras un recuperador está operativo, el otro recuperador se halla en fase de deshielo, utilizando una pequeña parte del caudal de aire interior de salida (*defrosting section*). La ventaja de este sistema es que el recuperador está siempre operativo y no se requiere el consumo adicional de energía (*preheater*). La desventaja es que el equipo presenta un mayor coste.

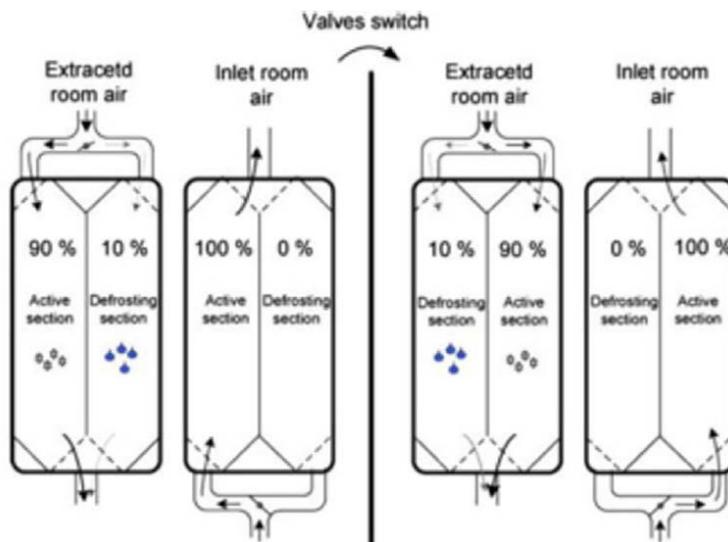


Fig. 26. Recuperadores de doble cuerpo de intercambio de calor

3.3. Descripción de los parámetros de comparación

3.3.1. Emplazamientos: Datos climáticos

Como datos de partida se utilizarán los datos facilitados por el Ministerio de Fomento (archivos ‘.met’, del software LIDER y CALENER), que comprenden 48 localidades del estado español, y en ellas se encuentran identificadas tanto la temperatura como la humedad relativa para las 8760 horas que conforman el año prototipo histórico.

El mapa siguiente muestra las poblaciones analizadas:



Fig. 27. Mapa representando las ciudades que se estudiarán

Si bien es cierto que los datos climáticos se pueden obtener a través de muchas fuentes, se ha considerado tratar con estos por ser unos datos publicados de forma oficial y que son utilizados por programas informáticos reconocidos como son el 'Energy Plus' [49]

Los archivos '.met' son archivos de texto que tienen la siguiente estructura:

1. Primera línea con una cadena de texto identificativa del archivo de datos.
2. Segunda línea con datos de: latitud, longitud, altitud y longitud de referencia para el cálculo de la hora oficial.
3. Siguen 8760 líneas con datos horarios formados por los campos siguientes:
 - a) Mes (1 a 12);
 - b) Día (1 a 31);
 - c) Hora (1 a 24);
 - d) Temperatura seca [°C];
 - e) Temperatura efectiva del cielo [°C];
 - f) Irradiancia solar directa sobre una superficie horizontal [W/m²];
 - g) Irradiancia solar difusa sobre una superficie horizontal [W/m²];
 - h) Humedad específica [kgH₂O/kg_{aire seco}];
 - i) Humedad relativa [%];
 - j) Velocidad del viento [m/s];
 - k) Dirección del viento (grados respecto al norte, E+, O-);
 - l) Azimut solar (grados);
 - m) Cénit solar (grados).

De todos estos parámetros, para este trabajo, sólo serán necesarios la altitud, temperatura seca y humedad relativa.

Los datos de estos archivos se han importado a una hoja de cálculo (Excel®) para allí, y con la programación de las ecuaciones del aire húmedo descritas en ASHRAE Fundamentals capítulo 1 [2], se han obtenido las otras propiedades (humedad absoluta, volumen específico y entalpía), que permitirán el análisis exhaustivo de las condiciones climáticas para cada población.

Estas ecuaciones, que han servido para poder conocer el resto de propiedades del aire húmedo, se detallan a continuación:

- Determinación de la presión del aire [kPa] en base a la altitud [m]

$$P = 101,325 \cdot (1 - 0,0000225577 \cdot \text{altitud})^{5,2559} \quad \text{ec. 7}$$

- Determinación de la en base a la humedad relativa [tanto por uno, φ]
 - Presión de vapor en saturación [kPa] en función de la temperatura [K]

$$P_{ws} = e^{\left(\frac{5800,2206}{T} + 1,3914993 - 0,048640239 \cdot T + 4,1764768 E - 05 \cdot T^2 - 1,4452093 E - 08 \cdot T^3 + 6,5459673 \cdot \log(T) \right)} \quad \text{ec. 8}$$

- humedad absoluta [$\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{as}}$]

$$w = 0,621945 \cdot \varphi \frac{P_{ws}}{P - P_{ws}} \quad \text{ec. 9}$$

- Determinación de la entalpía del aire [kJ/kg]

$$h = 1,006 \cdot T + w \cdot (2501 + 1,805 \cdot T) \quad \text{ec. 10}$$

- Determinación del volumen específico [m^3/kg]

$$V_{\text{esp}} = \frac{8314,472 \cdot T \cdot (1 + 1,607858 \cdot w)}{(28,966 \cdot P \cdot 1000)} \quad \text{ec. 11}$$

Con los valores de la presión, temperatura seca y humedad absoluta, se pasa a representar los datos climáticos horarios de cada población sobre un diagrama psicrométrico (Fig. 28), en el que se puede observar la gran disparidad de valores que se pueden encontrar, con lo que es fácil poder deducir que no será sencillo ni trivial la elección de recuperador correcto.

Así mismo, también se puede observar cómo habrá comportamientos diferentes ya sea para la temporada de invierno (modo calefacción) y para la temporada de verano (modo refrigeración).

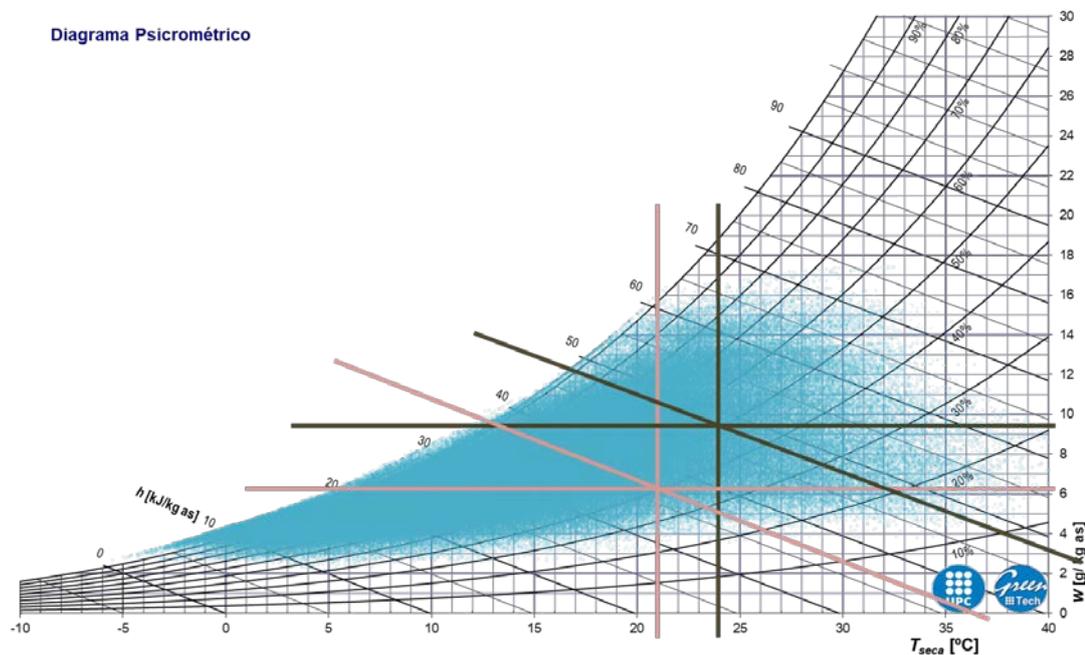


Fig. 28. Representación de los datos climáticos del conjunto de todas las poblaciones en un diagrama psicrométrico

3.3.2. Condiciones exteriores del aire de ventilación

Como se ha visto hasta ahora, la carga de ventilación representa un parámetro importante para poder decidir un buen diseño de instalación de climatización y, sobretodo, a la hora de poder tratar los ahorros energéticos. Ahora bien, la correcta selección del sistema de recuperación en función de las condiciones exteriores del aire será de vital importancia.

Estas condiciones exteriores harán que sea más aconsejable un recuperador de tipo sensible (HRV) o uno de entálpico (ERV).

Si bien se disponen de mapas peninsulares de distribuciones de temperaturas o de radiación o también de mapas que determinan zonas climáticas, estos no ofrecen la suficiente información que permita poder escoger una tipología u otra de recuperador de forma sencilla y con garantías de éxito.

También, tradicionalmente, se han asociado los HRV a ciudades con clima seco y los ERV a ciudades con clima más húmedo, pero como se verá en el ejemplo posterior, esto nos puede llevar con facilidad a engaño.

Será pues de suma importancia poder elaborar unos mapas o gráficos que no representen únicamente la temperatura ambiente, sino que también puedan representar el contenido energético del aire (combinación entre la temperatura y la humedad), discriminando la estación de verano (o refrigeración) de la de invierno (o calefacción).

Esta representación se podría efectuar sobre un diagrama psicrométrico. Ahora bien, como se puede ver en el ejemplo siguiente (comparativa entre una ciudad costera como puede ser Barcelona y una ciudad interior, como puede ser Madrid), la decisión de cuál es el mejor recuperador a contemplar en cada uno de los casos no es sencilla.

A continuación, se muestran la nube de puntos de los datos climáticos para las 8760 horas anuales representados sobre un diagrama psicrométrico para Madrid (interior) y para Barcelona (costera), sobre las que se indican las zonas de recuperación sensible y entálpica, en las temporadas de invierno y de verano.

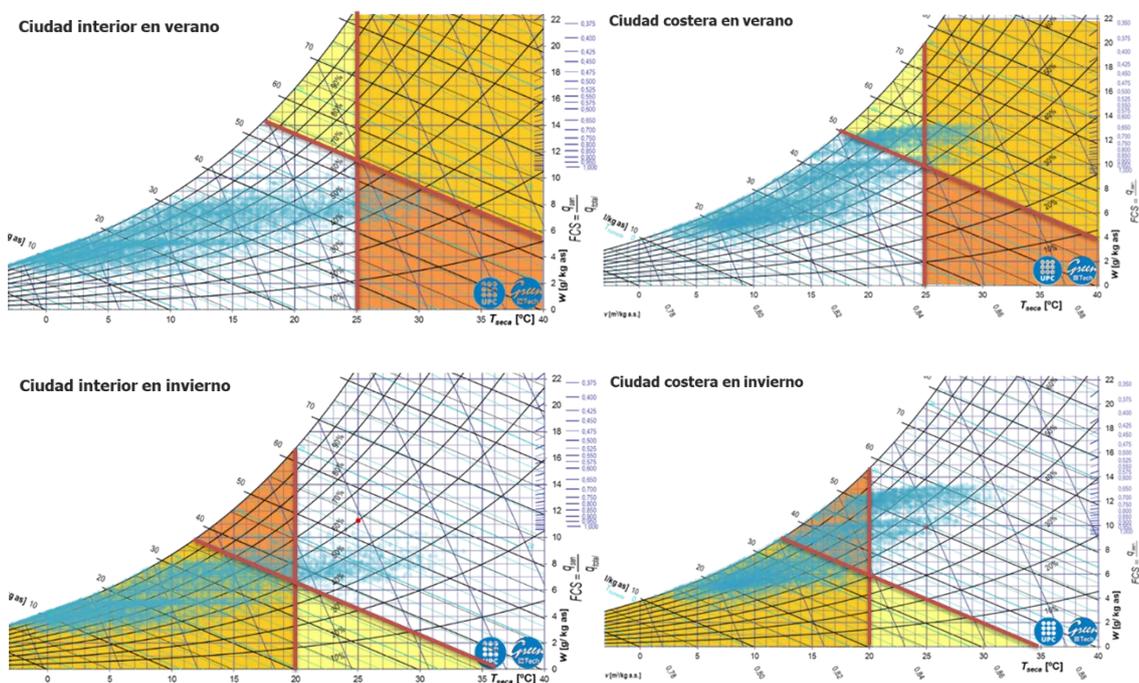


Fig. 29. Ejemplo de nubes de puntos anual de condiciones climáticas

A la vista de estos gráficos, es difícil poder tomar una decisión en cuanto al recuperador más adecuado en cada caso. Si nos fijamos en verano, para la ciudad interior, se deduce que un recuperador de tipo entálpico (ERV) no tendría sentido su utilización, siendo más aconsejable el estático (HRV). Todo al contrario pasa en la ciudad costera, donde se ve claramente la ventaja del ERV frente el HRV.

En cambio, si se realiza el mismo análisis para invierno, en el caso de la ciudad interior, la diferencia entre lo que puede aportar un ERV versus el HRV no es tan grande, pudiendo

pensar que con el uso del ERV la falta de humedad con la que se encuentran los locales durante este período (nótese que la humedad absoluta exterior está en muchas ocasiones por debajo de la humedad absoluta interior) se podría ver compensada sin la necesidad de haber de incorporar ningún tipo de equipo adicional, como podría ser un humectador. Pero si se analiza la ciudad costera, aquí la diferencia entre ambos tipos de recuperadores no es tan notable.

Con lo que la toma de decisión de cuál es el recuperador más adecuado en cada caso no es evidente y, además, se pone de manifiesto que el criterio de ciudad interior va con recuperador sensible y ciudad costera con entálpico, queda totalmente descartado.

3.3.3. Descripción edificios y usos: Caracterización de la ocupación

Este estudio, al tener como finalidad, poder saber el máximo potencial de recuperación de calor que hay empleando un tipo u otro de recuperador, éste debería ser independiente del tipo de edificio y uso que tenga, al poderse realizar la comparativa por unidad de aire tratado.

Ahora bien, este planteamiento puede llevar a error, ya que podría darse el caso que las horas, o días, donde uno de los sistemas pudiera recuperar más cantidad de energía fueran las horas, o días, en que no estuviera en funcionamiento el edificio y, por lo tanto, tampoco el sistema de recuperación.

A pesar de ello, para poder verificar el máximo potencial de recuperación, se partirá de la hipótesis que el sistema está en funcionamiento las 24 horas y los 365 días del año. En este caso el estudio se realizará por unidad de masa de aire tratado [J/kg].

Una vez obtenidos los correspondientes valores se podrá proceder al análisis comparativo para diferentes tipologías de edificios y usos. Ahora bien, en cualquier situación, se van a seguir considerando que las condiciones interiores, tanto en verano como en invierno, se mantienen, no teniendo influencia, de esta forma, la carga interna que se haya en el edificio.

El problema recae cuando se ha de caracterizar el edificio, es decir, cómo definir el uso horario del mismo. Es diversa la literatura que expone diferentes caracterizaciones horarias en función de la tipología de edificio, basándose en la actividad que se realiza y como esta caracterización afecta al consumo de las diversas instalaciones [36][37]. Como se desprende de la lectura de la literatura citada, es difícil predecir la ocupación prevista que habrá en el edificio para cada hora, ya que, aunque se trate de edificios con la misma actividad, no siempre tienen porqué coincidir los perfiles. Es cierto que en edificios 24/7, tipo hospitalario, es más sencillo poder predecir el perfil. En cambio, en edificios de tipo administrativo o comercial, los diferentes horarios y la diversidad de ocupaciones que se pueden encontrar, hace más dificultosa su predicción.

Esta incertidumbre afecta de formas diferentes en el consumo energético asociado al sistema de climatización según se trate de climas cálidos o fríos, húmedos o secos [38].

En este trabajo se han considerado los perfiles de ocupación definidos en la guía técnica publicada por IDAE “Ahorro de energía mediante enfriamiento gratuito y recuperadores de calor con humectador adiabático en la extracción” [42]. Estos mismos perfiles son los utilizados por programas de simulación certificados (Calener).

A título de ejemplo se muestra el perfil propuesto para un edificio de uso de oficinas:

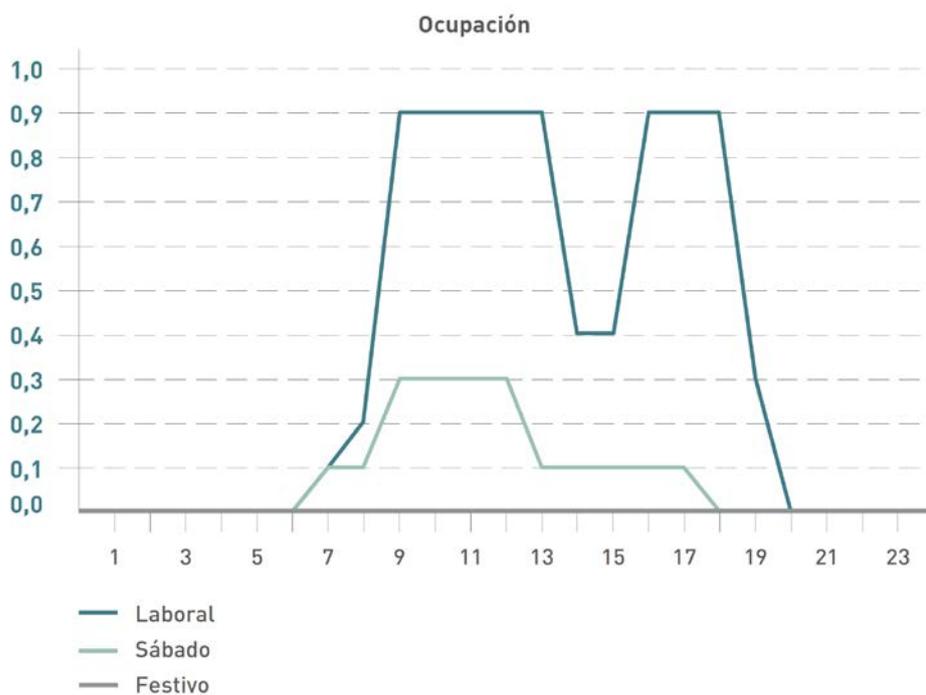


Fig. 30. Perfil horario de ocupación según IDAE

La implementación de estos a las simulaciones hará que se tengan que cambiar la forma en la que se expresen los resultados. Antes de introducir los perfiles de ocupación, los valores de ahorro por cada uno de los recuperadores simulados se expresan por unidad de masa de aire intercambiado [kJ/kg] habiéndose de cambiar a expresarse por persona de ocupación [kJ/persona]. De forma que sea más sencillo poder evaluar el potencial de ocupación para cada caso en concreto que únicamente multiplicar el potencial de ahorro obtenido por la ocupación que se tenga.

Ahora bien, para poder realizar el cambio se tiene que asignar una cantidad de aire de ventilación por persona. Esta asignación se ha realizado según se indica en el RITE, en el apartado de su IT 1.1.4.2.2. “Categorías de calidad del aire interior en función del uso de los edificios”.

| Categoría | dm ³ /s por persona |
|-----------|--------------------------------|
| IDA 1 | 20 |
| IDA 2 | 12,5 |
| IDA 3 | 8 |
| IDA 4 | 5 |

Tabla 6. Caudales de aire exterior (tabla 1.4.2.1 RITE)

Al estar estos valores en unidades de volumen en lugar de masa, se tiene que utilizar el volumen específico del aire exterior para poder realizar la conversión correspondiente.

3.4. Regulación del recuperador

3.4.1. Zonas de recuperación sobre el diagrama psicrométrico

Ya se ha indicado que, las posibilidades de la recuperación de calor y la magnitud de ésta, dependerá tanto de la eficiencia del recuperador, como de las condiciones del aire exterior e interior.

Para ilustrar esto último, y dado que el signo de la diferencia de temperatura, humedad o entalpía, se muestra importante para el análisis, pues es clave en la estrategia de regulación que definen los fabricantes ver [40] y ASRHAЕ Journal [41], vamos a dividir el diagrama psicrométrico en diferentes áreas tal como muestra la Fig. 31, en que, si la temperatura exterior es mayor que la interior T_i , estaremos en una zona donde hay posibilidades de recuperar calor sensible en verano y en caso de ser inferior, podría recuperarse en invierno (fig. izquierda).

La figura de la derecha muestra lo mismo en relación a la entalpía y por tanto de las zonas de recuperación simultánea de calor sensible y latente.

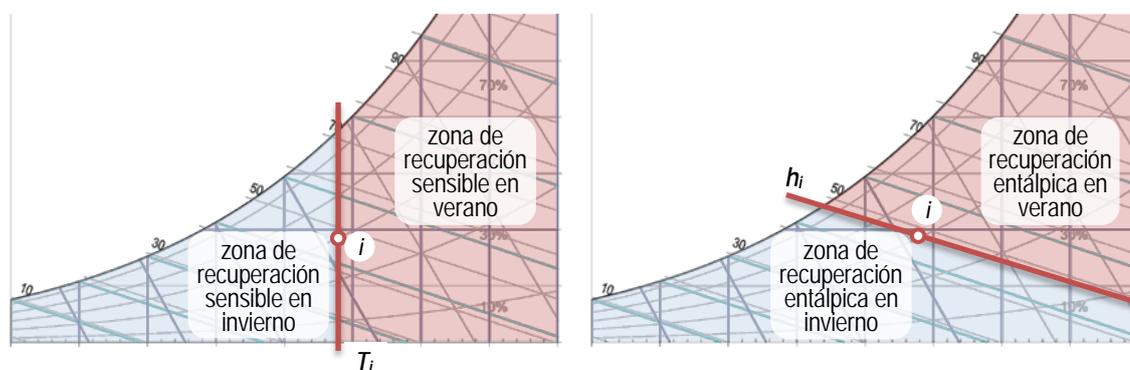


Fig. 31 Zonas de recuperación de calor sensible (izquierda) y entálpica (derecha)

Dado que las zonas de actuación del recuperador sensible y del entálpico son distintas, ello supone que no siempre coincidirán los instantes en que uno y otro tipo de recuperador estén en funcionamiento.

3.4.2. Regulación tradicional

Ello es importante, pues no se trata sólo de cuál de ellos recuperaría más energía en unas condiciones dadas, sino el hecho de que hay ciertas condiciones exteriores, bajo las que uno de ellos podría estar en funcionamiento y el otro no, ya que las zonas indicadas son las mismas en que los sistemas de regulación y control dan orden de actuar sobre uno u otro tipo de recuperador.

Si se superponen ambos diagramas, aparecen 4 zonas: en las zonas 1 y 3 coinciden los signos de la diferencia de temperaturas y entalpías $(T_o - T_i) \cdot (h_o - h_i) > 0$, por lo que en ambas, los dos tipos de recuperador, sensible y entálpico, recibirían idéntica orden de entrar en funcionamiento y tendrá lugar por tanto la recuperación de energía (en la zona 3 durante el verano y en la zona 1 durante el invierno).

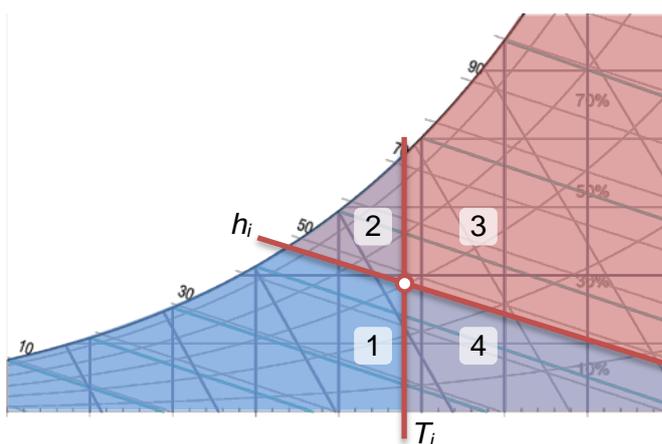


Fig. 32 Zonas de recuperación de calor sensible y entálpica en invierno y verano

En cambio, en las zonas 2 y 4 únicamente funcionaría uno de los dos tipos de recuperador: en la 2 lo haría el entálpico en verano y el sensible en invierno, mientras que en la zona 4 trabajaría el entálpico en invierno y el sensible en verano tal como resume en la siguiente tabla:

| zona | $T_o - T_i$ | $h_o - h_i$ | Funcionamiento del recuperador en Verano | | Funcionamiento del recuperador Invierno | |
|------|-------------|-------------|--|-----------|---|-----------|
| | | | Sensible | Entálpico | Sensible | Entálpico |
| 1 | - | - | | | SI | SI |
| 2 | - | + | | SI | SI | |
| 3 | + | + | SI | SI | | |
| 4 | + | - | SI | | | SI |

Tabla 7 Posibilidades de recuperación sensible y entálpica en las diferentes zonas

Habitualmente, en las zonas 1 y 3, el entálpico recuperará más energía que el sensible, y en base a ello parece que la decisión de optar por uno u otro consiste en analizar si el ahorro adicional que proporciona el recuperador entálpico compensa su mayor coste frente al sensible. Sin embargo, conviene analizar también lo que sucede en las otras zonas (2 y 4).

En efecto, no siempre el recuperador entálpico recupera más energía que uno sensible, pues como vemos en la tabla, hay condiciones en las que el sensible estaría recuperando energía mientras que el entálpico estaría parado y no recuperaría nada (zonas 4 en verano y zona 2 en invierno). Si bien también las hay en que sucede todo lo contrario y es el entálpico el que trabaja mientras el sensible está parado (zona 2 en verano y 4 en invierno).

Será pues necesario conocer cómo evolucionan las condiciones exteriores a lo largo de todo el año, saber cómo se distribuyen entre las diferentes zonas anteriores y poder evaluar, punto a punto, el potencial de recuperación.

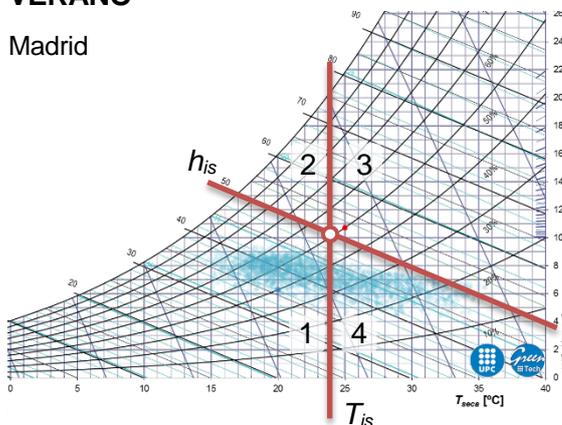
Ejemplo de comparación cualitativa

Si representamos sobre el diagrama psicrométrico las condiciones exteriores que se dan hora a hora en una ciudad, obtenemos una nube de puntos, la cual se distribuye, con mayor o menor concentración, por cada una de las 4 zonas de recuperación definidas anteriormente partiendo de las condiciones interiores.

Como ejemplo, se han tomado dos ciudades españolas con climas claramente diferenciados (interior y costero) como son Madrid y Barcelona, y en las siguientes figuras se han representado las temporadas de verano e invierno

VERANO

Madrid



Barcelona

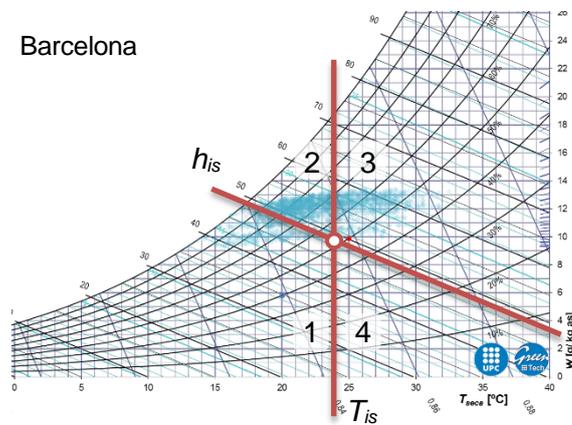


Fig. 33 Nubes de condiciones climáticas en verano de Madrid y Barcelona

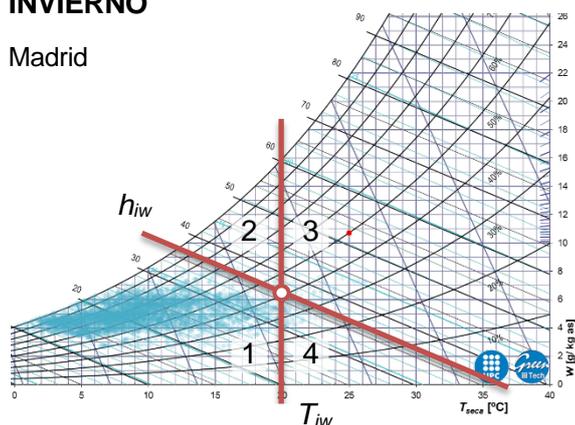
Durante el verano, ambas ciudades presentan una considerable cantidad de horas por encima de la temperatura interior T_{is} , por lo que las dos tienen un buen margen para la recuperación de energía sensible.

Sin embargo, dado que en Madrid la humedad es claramente menor, la práctica totalidad de las condiciones se sitúan por debajo de la entalpía interior h_i , por lo que un ERV no entraría en funcionamiento casi nunca, y sería más interesante un HRV. En Barcelona sucede todo lo contrario, las condiciones en verano están mayoritariamente por encima de h_i , por lo que será más recomendable el uso de ERV en detrimento de los HRV.

Veamos ahora la comparativa en condiciones de invierno i comprobemos si los resultados corroboran lo comentado para el verano.

INVIERNO

Madrid



Barcelona

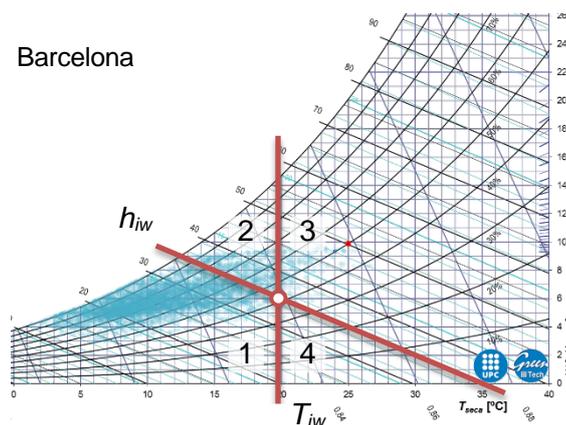


Fig. 34 Nubes de condiciones climáticas en invierno de Madrid y Barcelona

Si analizamos las nubes de puntos que muestran en invierno la Fig. 34, observamos que, en ambas ciudades, la temperatura exterior es casi siempre inferior a la interior, por lo que, al igual que en verano, las dos serían buenas candidatas a utilizar HRV. Sin embargo, la menor humedad de Madrid hace que en esta ciudad la nube se concentre casi exclusivamente en la zona 1, con entalpías inferiores a la interior, lo que le supone un potencial para un ERV que es incluso mayor que en Barcelona, en que hay numerosos puntos en la zona 2 en la que un ERV no entraría en funcionamiento.

Se pone de manifiesto que, incluso con un sencillo análisis cualitativo como el anterior, dependiendo de la climatología de la zona, el tipo de recuperador que convendría utilizar en estas ciudades puede ser distinto según sea verano o invierno, lo cual complica el dilema de cuál de ellos debe instalarse.

3.4.3. Regulación alternativa propuesta

Lo expuesto anteriormente abre la puerta a un tema muy interesante, como sería el análisis de posibles mejoras en la estrategia de regulación de los recuperadores entálpicos, como vía que abre nuevas posibilidades de ahorro energético en los mismos.

El origen del problema es que, a nivel práctico, la recuperación de calor latente únicamente se puede realizar mediante el uso de recuperadores entálpicos y por tanto siempre va necesariamente unida a la recuperación de energía sensible, en definitiva, no existen equipos que permitan recuperar únicamente calor latente.

Poner de manifiesto y cuantificar la ineficiencia que supone este hecho, será precisamente uno de los objetivos de este análisis.

Si añadimos al diagrama psicrométrico la línea horizontal de humedad absoluta interior, tanto la zona 1 como la zona 3, se dividen en 2 subzonas (a y b), por lo que el diagrama quedará finalmente dividido en las 6 zonas de la figura:

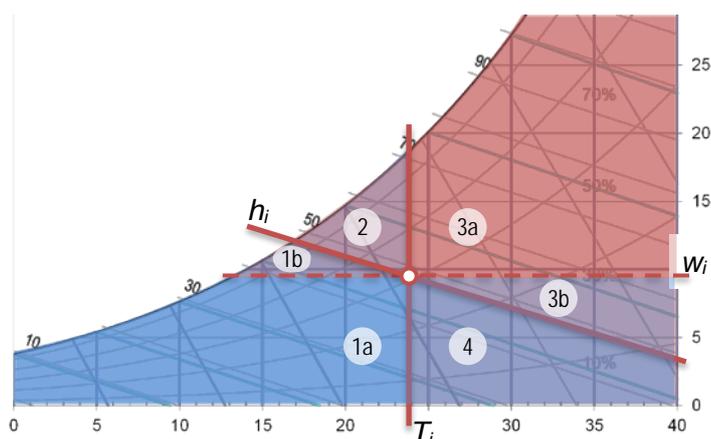


Fig. 35 Zonas de recuperación de calor sensible, latente y entálpico en invierno y verano

De forma convencional, la orden del sistema de regulación y control para que se ponga en marcha el recuperador de calor depende de si la comparación de condiciones interiores y exteriores es positiva o negativa. La siguiente tabla, muestra dicho signo para las distintas variables en juego, y dependiendo de si es época de invierno o de verano. Se indica además si sería posible la recuperación de calor sensible, latente o bien ambos, para cada una de las 6 zonas: 1a, 1b, 2, 3a, 3b y 4.

| zona | $T_o - T_i$ | $h_o - h_i$ | $w_o - w_i$ | Posibilidad de Recuperación en Verano | | | Posibilidad de Recuperación en Invierno | | |
|------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------------|-----------|---------|---|-----------|---------|
| | | | | Sensible | Entálpica | Latente | Sensible | Entálpica | Latente |
| 1 | 1a | - | - | - | | | SI | SI | SI |
| | 1b | - | - | + | | | SI* | SI | |
| 2 | - | + | + | | SI | SI | SI | | |
| 3 | 3a | + | + | + | SI | SI | SI | | |
| | 3b | + | + | - | SI | SI | | | SI* |
| 4 | + | - | - | SI | | | | SI | SI |

Tabla 8 Posibilidades de recuperación sensible, latente y entálpica en las diferentes zonas

Cuando el signo de la diferencia de cualquiera de las variables (temperatura, entalpía o humedad absoluta), sea positivo en verano o negativo en invierno, significa que es posible la recuperación de energía sensible, entálpica o latente respectivamente.

En las zonas 1 (a y b) y 3 (a y b) coinciden los signos de la diferencia de temperaturas y entalpías $(T_o - T_i) \cdot (h_o - h_i) > 0$, por lo que en ambas zonas los dos tipos de recuperador, sensible y entálpico, recibirían idéntica orden de entrar en funcionamiento y tendrá lugar por tanto la recuperación de energía (en la zona 3 durante el verano y en la zona 1 durante el invierno).

No obstante, ello no siempre es conveniente en el caso de tratarse de un recuperador entálpico, pues en ellos la recuperación latente no se puede realizar independientemente de la sensible, y por tanto aparece un problema cuando el signo de la diferencia de temperaturas sea contrario al de la diferencia de humedades, lo cual sucede hasta en 4 de las 6 zonas (1b, 3b, 2 y 4).

Parece que sólo cuando el signo de la diferencia entre el valor interior y exterior, para las 3 magnitudes sea el mismo (zonas 3a en verano y 1a en invierno, sombreadas en color verde en la tabla), resulta evidente que sea cual sea el tipo de recuperador utilizado, el mismo estaría recuperando energía latente y/o sensible en el sentido que interesa.

Se ponen de manifiesto algunos posibles conflictos:

- a. En la zona 3b en verano, y 1b en invierno uso de un recuperador entálpico supone que recuperar calor sensible conlleva perder calor latente.
- b. En la zona 2 en verano, y 4 en invierno uso de un recuperador entálpico supone que recuperar calor latente conlleva perder calor sensible.
- c. En la zona 1b en verano, y 3b en invierno hay potencial de recuperación de energía latente, que es desaprovechado puesto que el recuperador entálpico no se pone en marcha debido al signo de la diferencia de entalpías que lo regula.
- d. En la zona 4 en verano, y 2 en invierno funcionaría un recuperador sensible, mientras que estaría parado el de tipo entálpico. Ello supone que éste último, desaprovechará el potencial de recuperación de energía sensible existente, por culpa del criterio de la diferencia de entalpías que lo regula.

En realidad, los 2 primeros (a y b) no son tales conflictos pues como veremos posteriormente, y según recoge la ec. 27, debe considerarse el valor absoluto de la diferencia y por tanto es irrelevante el signo de la diferencia a la hora de cuantificar la recuperación.

Con respecto al caso c., es cierto que se pierde potencial de recuperación latente, pero ello es así tanto con independencia del tipo de recuperador, por lo que en un estudio comparativo no habría ninguna diferencia entre ellos. Por otro lado, se trata de dos zonas relativamente reducidas (1b en verano y 3b en invierno), que no acumulan una gran cantidad de horas. Se ha podido comprobar que el potencial de recuperación latente en ellas es reducido, a la vez que complicaría el sistema de R&C.

Para evaluar el alcance de la problemática del caso d. se constata por un lado que las condiciones de temperatura y humedad, tanto de la zona 2 en invierno, como de la 4 en verano, pueden presentarse con bastante frecuencia (tal como muestran las distribuciones de para Madrid en verano (Fig. 33 izquierda) o para Barcelona en invierno (Fig. 34 derecha), y por tanto son zonas que pueden albergar un gran número de horas en ha procedido a cuantificar el potencial de ahorro perdido como consecuencia.

En definitiva, es esta última situación la que podría ofrecer una mejora significativa del potencial de ahorro energético en los recuperadores entálpicos, el cual se podría conseguir de forma extraordinariamente sencilla sin más que modificar el criterio tradicional de regulación y control que los gobierna, lo cual además no supone ningún coste añadido en el sistema.

Esencialmente se trataría de gobernar la puesta en marcha del recuperador entálpico no únicamente en base a la diferencia de entalpías sino observando también la diferencia de temperatura, de forma que si cualquiera de ellas es positiva en verano o negativa en invierno, el recuperador entraría en funcionamiento.

La siguiente tabla muestra una comparativa de las zonas en que trabajaría el recuperador entálpico en función de si dispone de una regulación tradicional, o bien de la regulación propuesta (se somborean las nuevas zonas de actuación).

| zona | $T_o - T_i$ | $h_o - h_i$ | Regulación convencional recuperador Entálpico | | Regulación alternativa recuperador Entálpico | |
|------|-------------|-------------|---|----------|--|----------|
| | | | Verano | Invierno | Verano | Invierno |
| 1 | - | - | | SI | | SI |
| 2 | - | + | SI | | SI | SI |
| 3 | + | + | SI | | SI | |
| 4 | + | - | | SI | SI | SI |

Tabla 9 Posibilidades de recuperación regulación convencional vs. Regulación alternativa

Si representamos en el diagrama psicrométrico será más visible esta diferencia y la ampliación de las zonas de trabajo conseguidas.

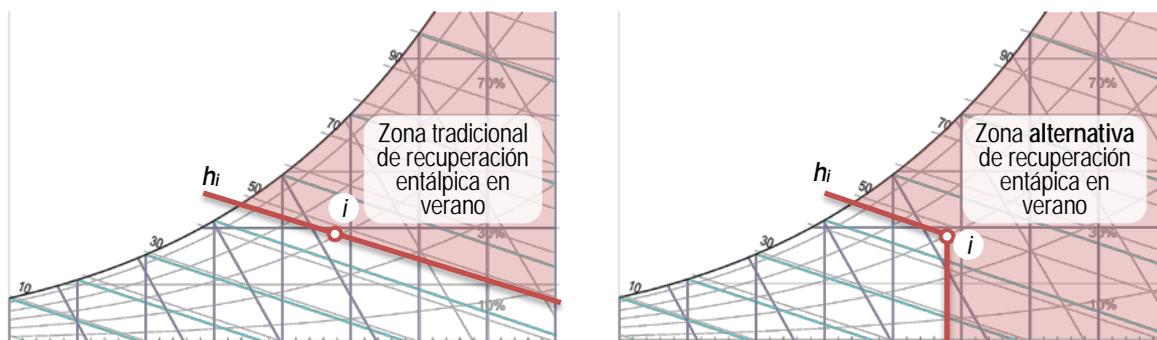


Fig. 36 Zonas de recuperación entálpica en verano: tradicional (izquierda) y T_i la regulación propuesta (derecha)

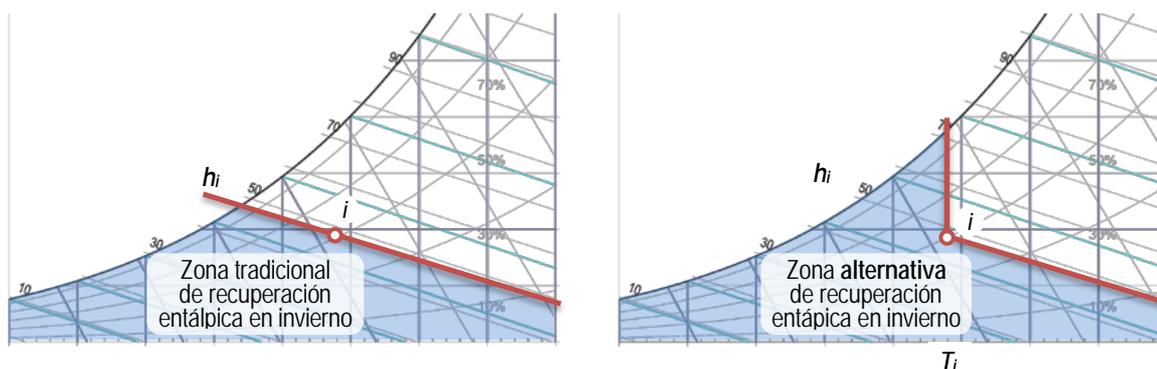


Fig. 37 Zonas de recuperación entálpica en invierno: tradicional (izquierda) y con la regulación propuesta (derecha)

Vemos en la comparativa que las zonas sobre el diagrama psicrométrico es claramente mayor con la regulación alternativa propuesta para los recuperadores entálpicos, y si el número de horas en que las condiciones climatológicas se ubican dentro de la misma es elevado, el incremento del potencial de ahorro será significativo.

Si contabilizamos este aumento de horas de funcionamiento del recuperador entálpico, y a nivel global de todas las ciudades analizadas supone en promedio un incremento anual de horas de funcionamiento de unas 375 h/año, con un máximo (Madrid) que se acerca a las 1000 horas.

Son por tanto cifras considerables, que a priori invitan a pensar que el cambio del sistema de regulación podría suponer significativos incrementos en el potencial de energía recuperada, los cuales mostraremos más adelante en el apartado de resultados.

3.5. Consumos adicionales

Como se ha expuesto con anterioridad, la incorporación del recuperador de calor en la instalación provoca una serie de alteraciones que conllevan a un aumento del consumo de

las mismas, haciendo que el ahorro que se pueda tener con el recuperador se vea ligeramente reducido.

Estos consumos serán:

3.5.1. Consumo ventiladores

Este aumento en el consumo de los ventiladores, tanto de impulsión como de extracción, es debido al incremento de pérdida de carga asociada a la incorporación del recuperador de calor y los filtros adicionales.

El valor del incremento de consumo se puede evaluar directamente como el incremento de pérdida de carga introducida, ya que el caudal de aire de ventilación se debe mantener, según la siguiente expresión:

$$\Delta W_{vent} = \Delta P \cdot Q \quad \text{ec. 12}$$

3.5.2. Consumo motor recuperador rotativo

En el caso de la utilización de recuperadores de tipo rotativa es necesario añadir el consumo del motor eléctrico que hace girar la rueda.

Esta rueda funciona siempre que esté el sistema de ventilación operativo, exceptuando los momentos en que se detecte que se puede operar en modo “free-cooling”, ya que, en esta situación, al no ser necesaria la recuperación de calor, se para el funcionamiento de la rueda.

El consumo de este motor puede oscilar entre los 0,1 kW a 1 kW, según el caudal de aire que se esté moviendo.

3.5.3. Consumo enfriamiento adiabático

Este equipo, que no siempre está operativo, sino sólo lo hará en base a las necesidades de aumentar el nivel de recuperación y, por lo tanto, aumentar el ahorro energético en base a las condiciones de las condiciones de los flujos de aire, añade al sistema dos tipos de consumos, a parte del propio consumo de agua.

El primero de los consumos será por la introducción de una pérdida de carga en interponer un elemento en medio de la corriente de aire. Este consumo será permanente, esté el equipo operativo o no.

Un segundo consumo estará asociado a la bomba que hace circular el agua que permitirá humectar el aire. Este consumo únicamente existirá en el momento que esté operativo el equipo.

3.5.4. Contabilización sobreconsumo

Para analizar lo que representan estos consumos se ha considerado una instalación tipo. En concreto una instalación que incorpore un recuperador de tipo estático, con una calidad de aire IDA-2, 45 m³/h/persona, una pérdida de carga del recuperador más filtros de 200 Pa (según se expone en el RITE) y un rendimiento del motor del ventilador del 90%.

Con estas hipótesis se determina que el sobreconsumo del ventilador es de 2,8 W/persona, según la siguiente expresión

$$\Delta W_{vent} = \Delta P \cdot Q = \frac{200 \cdot 45}{3600 \cdot 0,9} = 2,8 \text{ W/persona} \quad \text{ec. 13}$$

Y este sobreconsumo, a lo largo de un año, contemplando las horas en que el recuperador está en funcionamiento, representa para cada población:

| Población | Horas func RSen (h) | Horas func REnt (h) | ConsumoRS (MJ/persona/año) | ConsumoRE (MJ/persona/año) |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| albacete | 6370 | 5944 | 63,70 | 59,44 |
| alicante | 5206 | 6237 | 52,06 | 62,37 |
| almeria | 4976 | 5892 | 49,76 | 58,92 |
| avila | 6566 | 6476 | 65,66 | 64,76 |
| badajoz | 5813 | 5502 | 58,13 | 55,02 |
| barcelona | 5617 | 6493 | 56,17 | 64,93 |
| bilbao | 5775 | 5800 | 57,75 | 58,00 |
| burgos | 6609 | 6452 | 66,09 | 64,52 |
| caceres | 6083 | 5265 | 60,83 | 52,65 |
| cadiz | 4571 | 5849 | 45,71 | 58,49 |
| castello | 5413 | 6423 | 54,13 | 64,23 |
| ciudadreal | 6006 | 5635 | 60,06 | 56,35 |
| cordoba | 5529 | 5457 | 55,29 | 54,57 |
| cuenca | 6368 | 5745 | 63,68 | 57,45 |
| gerona | 5926 | 6182 | 59,26 | 61,82 |
| granada | 5977 | 5385 | 59,77 | 53,85 |
| guadalajara | 6108 | 5762 | 61,08 | 57,62 |
| huelva | 4950 | 5411 | 49,50 | 54,11 |
| huesca | 5942 | 5693 | 59,42 | 56,93 |
| jaen | 6363 | 6127 | 63,63 | 61,27 |
| lacoruna | 5765 | 5157 | 57,65 | 51,57 |
| leon | 6445 | 6342 | 64,45 | 63,42 |
| lerida | 5810 | 5874 | 58,10 | 58,74 |
| logrono | 6215 | 5979 | 62,15 | 59,79 |
| lugo | 6737 | 6287 | 67,37 | 62,87 |
| madrid | 6099 | 5214 | 60,99 | 52,14 |
| malaga | 4953 | 5610 | 49,53 | 56,10 |
| murcia | 5244 | 6327 | 52,44 | 63,27 |
| oreense | 6025 | 5863 | 60,25 | 58,63 |
| oviedo | 6449 | 5908 | 64,49 | 59,08 |
| palencia | 6300 | 6085 | 63,00 | 60,85 |
| palmamallorca | 5677 | 6788 | 56,77 | 67,88 |
| pamplona | 6068 | 5841 | 60,68 | 58,41 |
| pontevedra | 5379 | 5166 | 53,79 | 51,66 |
| salamanca | 6096 | 5787 | 60,96 | 57,87 |
| sansebastian | 6047 | 5787 | 60,47 | 57,87 |
| santander | 5805 | 5723 | 58,05 | 57,23 |
| segovia | 6465 | 6073 | 64,65 | 60,73 |
| sevilla | 5299 | 5409 | 52,99 | 54,09 |
| soria | 6600 | 6459 | 66,00 | 64,59 |
| tarragona | 5695 | 6560 | 56,95 | 65,60 |
| teruel | 6498 | 6313 | 64,98 | 63,13 |
| toledo | 6124 | 5663 | 61,24 | 56,63 |
| valencia | 5464 | 6623 | 54,64 | 66,23 |
| valladolid | 6274 | 5835 | 62,74 | 58,35 |
| vitoria | 6430 | 6188 | 64,30 | 61,88 |
| zamora | 6081 | 5652 | 60,81 | 56,52 |
| zaragoza | 5973 | 5851 | 59,73 | 58,51 |

Tabla 10. Sobreconsumo ventilador por incorporar recuperador y filtros, recuperador estático

Ahora bien, si se quisiera realizar el mismo análisis para los recuperadores de tipo rotativo, en la que se debería contemplar el consumo asociado al motor de la rueda, haría falta poder saber cómo se repercute este consumo por persona.

De forma general, el consumo del motor para accionar la rueda puede ir desde los 25 W, para caudales alrededor de los 1000 m³/h, hasta los 370 W para caudales de hasta 24000 m³/h (información extraída del fabricante Recuperator, <http://www.recuperator.eu>).

Si se supone una instalación con una calidad de aire IDA-2, 45 m³/h/persona, considerando la situación más desfavorable, donde la repercusión del consumo del motor por persona será mayor, se obtiene que este valor será de:

$$\Delta W_{vent} = \frac{W_{rueda}}{Q} = \frac{25}{1100} \cdot \frac{45}{45} = 1,02 \text{ W/persona} \quad \text{ec. 14}$$

Y este sobreconsumo, a lo largo de un año, contemplando las horas en que el recuperador está en funcionamiento, representa para cada población:

| Población | Horas func RSen (h) | Horas func REnt (h) | ConsumoRS (MJ/persona/año) | ConsumoRE (MJ/persona/año) |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| albacete | 6370 | 5944 | 23,45 | 21,88 |
| alicante | 5206 | 6237 | 19,17 | 22,96 |
| almeria | 4976 | 5892 | 18,32 | 21,69 |
| avila | 6566 | 6476 | 24,17 | 23,84 |
| badajoz | 5813 | 5502 | 21,40 | 20,26 |
| barcelona | 5617 | 6493 | 20,68 | 23,91 |
| bilbao | 5775 | 5800 | 21,26 | 21,35 |
| burgos | 6609 | 6452 | 24,33 | 23,76 |
| caceres | 6083 | 5265 | 22,40 | 19,38 |
| cadiz | 4571 | 5849 | 16,83 | 21,53 |
| castello | 5413 | 6423 | 19,93 | 23,65 |
| ciudadreal | 6006 | 5635 | 22,11 | 20,75 |
| cordoba | 5529 | 5457 | 20,36 | 20,09 |
| cuenca | 6368 | 5745 | 23,45 | 21,15 |
| gerona | 5926 | 6182 | 21,82 | 22,76 |
| granada | 5977 | 5385 | 22,01 | 19,83 |
| guadalajara | 6108 | 5762 | 22,49 | 21,21 |
| huelva | 4950 | 5411 | 18,23 | 19,92 |
| huesca | 5942 | 5693 | 21,88 | 20,96 |
| jaen | 6363 | 6127 | 23,43 | 22,56 |
| lacoruna | 5765 | 5157 | 21,23 | 18,99 |
| leon | 6445 | 6342 | 23,73 | 23,35 |
| lerida | 5810 | 5874 | 21,39 | 21,63 |
| logrono | 6215 | 5979 | 22,88 | 22,01 |
| lugo | 6737 | 6287 | 24,80 | 23,15 |
| madrid | 6099 | 5214 | 22,46 | 19,20 |
| malaga | 4953 | 5610 | 18,24 | 20,66 |
| murcia | 5244 | 6327 | 19,31 | 23,29 |
| oreense | 6025 | 5863 | 22,18 | 21,59 |
| oviedo | 6449 | 5908 | 23,74 | 21,75 |
| palencia | 6300 | 6085 | 23,20 | 22,40 |
| palmamallorca | 5677 | 6788 | 20,90 | 24,99 |
| pamplona | 6068 | 5841 | 22,34 | 21,51 |
| pontevedra | 5379 | 5166 | 19,80 | 19,02 |
| salamanca | 6096 | 5787 | 22,44 | 21,31 |
| sansebastian | 6047 | 5787 | 22,26 | 21,31 |
| santander | 5805 | 5723 | 21,37 | 21,07 |
| segovia | 6465 | 6073 | 23,80 | 22,36 |
| sevilla | 5299 | 5409 | 19,51 | 19,91 |
| soria | 6600 | 6459 | 24,30 | 23,78 |
| tarragona | 5695 | 6560 | 20,97 | 24,15 |
| teruel | 6498 | 6313 | 23,92 | 23,24 |
| toledo | 6124 | 5663 | 22,55 | 20,85 |
| valencia | 5464 | 6623 | 20,12 | 24,38 |
| valladolid | 6274 | 5835 | 23,10 | 21,48 |
| vitoria | 6430 | 6188 | 23,67 | 22,78 |
| zamora | 6081 | 5652 | 22,39 | 20,81 |
| zaragoza | 5973 | 5851 | 21,99 | 21,54 |

Tabla 11. Sobreconsumo ventilador por incorporar recuperador y filtros, recuperador rotativo

Como se verá más adelante, estos valores de sobreconsumo, respecto el ahorro conseguido por haber incorporado un recuperador, son menospreciables.

3.6. Influencia de la ocupación y uso del edificio

Hasta este momento el estudio se ha centrado en determinar el máximo potencial de recuperación de calor para cada uno de los tipos de recuperador ideal, sin contemplar tipologías de edificios, ocupación ni horarios de funcionamiento. Dado que es evidente que el nivel de ventilación requerido vendrá notablemente afectado por estos parámetros, vamos a introducirlos para diversas tipologías de edificio, al objeto de tener una idea de en qué medida puede afectar a los resultados a efectos prácticos, reduciendo el potencial de ahorro existente.

Para analizar la influencia de estos parámetros sobre nuestro modelo se han escogido 5 tipologías diferentes de edificios con su ocupación prevista, según se describe en la guía IDAE “Ahorro de energía mediante enfriamiento gratuito y recuperadores de calor con humectador adiabático en la extracción” [42]. Las tipologías son: oficinas, comercio, docencia, hotelero y centros de atención primaria (CAP).

Los tipos de edificios que se considerarán serán

- Oficinas
- Comercial
- Centros docentes
- Hotelero
- Centros de Atención Primaria (CAP)

El perfil de ocupación en cada instante n de incorpora mediante el factor $F_{ocup\ n}$, que representa el tanto por uno de ocupación que tiene lugar en dicho momento respecto a la máxima prevista para el edificio.

Se dispone para cada uno de ellos del valor del factor de ocupación horaria para cada día de la semana (laborables L-V, sábado S y domingo D) [42], resumidos en la siguiente tabla.

| | Oficinas | | | Comercios | | | Docencia | | | Hotelero | | | CAP | | |
|----|----------|-----|---|-----------|-----|---|----------|-----|---|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | L-V | S | D | L-V | S | D | L-V | S | D | L-V | S | D | L-V | S | D |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0,1 | 0 | 0 | 0,05 | 0 | 0 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0,2 | 0,3 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0,75 | 0,1 | 0 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 0,1 | 0,1 | 0 |
| 8 | 0,9 | 0,3 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,9 | 0,1 | 0 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 |
| 9 | 0,9 | 0,3 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,9 | 0,1 | 0 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,5 |
| 10 | 0,9 | 0,3 | 0 | 0,7 | 0,8 | 0 | 0,8 | 0,1 | 0 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,5 |
| 11 | 0,9 | 0,3 | 0 | 0,7 | 0,8 | 0 | 0,8 | 0,1 | 0 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,8 | 0,4 | 0,5 |
| 12 | 0,9 | 0,1 | 0 | 0,7 | 0,8 | 0 | 0,8 | 0 | 0 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,8 | 0,4 | 0,5 |
| 13 | 0,4 | 0,1 | 0 | 0,7 | 0,6 | 0 | 0,45 | 0 | 0 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,8 | 0,4 | 0,5 |
| 14 | 0,4 | 0,1 | 0 | 0,7 | 0,6 | 0 | 0,45 | 0 | 0 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,8 | 0,4 | 0,5 |
| 15 | 0,9 | 0,1 | 0 | 0,7 | 0,8 | 0 | 0,6 | 0 | 0 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,8 | 0,4 | 0,5 |
| 16 | 0,9 | 0,1 | 0 | 0,7 | 0,8 | 0 | 0,6 | 0 | 0 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,8 | 0,4 | 0 |
| 17 | 0,9 | 0 | 0 | 0,5 | 0,8 | 0 | 0,6 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,1 | 0 |
| 18 | 0,3 | 0 | 0 | 0,5 | 0,6 | 0 | 0,3 | 0 | 0 | 0,5 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | 0 |
| 19 | 0,1 | 0 | 0 | 0,3 | 0,6 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0 | 0 |
| 20 | 0,1 | 0 | 0 | 0,3 | 0,1 | 0 | 0,1 | 0 | 0 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,2 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0,3 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,2 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 12. Perfil de ocupación para un centro de atención primaria (CAP)

Ahora bien, la normativa marca el nivel de ventilación requerido por persona según la calidad de aire interior (IDA) exigido en el edificio, y es por ello que se ha creído también conveniente, obtener los resultados del potencial de ahorro energético anual por persona, para cada tipo de edificio según su nivel de ocupación.

En el apartado correspondiente de la formulación, se explica con detalle cómo se realiza dicha conversión para cada tipología de edificio, según el IDA que se indica en el RITE (ver Tabla 3).

Para poder aplicar los perfiles de ocupación a la formulación propuesta en este estudio se ha tomado como hipótesis que el caudal mínimo de ventilación será del 10%, que se aplicaría en el caso en que, habiendo ocupación, ésta fuera muy baja.

Se trataría pues de pasar de energía por unidad de masa ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{as}}$) a energía por persona ($\text{MJ}/\text{persona}$), lo cual se ha podido realizar asociando a cada persona el caudal volumétrico que para cada tipología de edificio, según el IDA que se indica en el RITE (ver Tabla 3), y multiplicando por la densidad del aire (pues el caudal de la tabla es en m^3).

3.7. Formulación

El estudio a realizar lleva a la necesidad de poder cuantificar de forma precisa el potencial de ahorro anual que podría proporcionar tanto un recuperador sensible como uno entálpico, al objeto de que los resultados sirvan de base sólida en la toma de decisiones con respecto a cuál de ellos es mejor instalar, dejando al margen así, la inercia de seguir criterios tradicionales o insuficientemente fundamentados.

3.7.1. La carga de ventilación

La siguiente figura ilustra en el diagrama psicrométrico, las condiciones del proceso de ventilación en un cierto instante durante el verano.

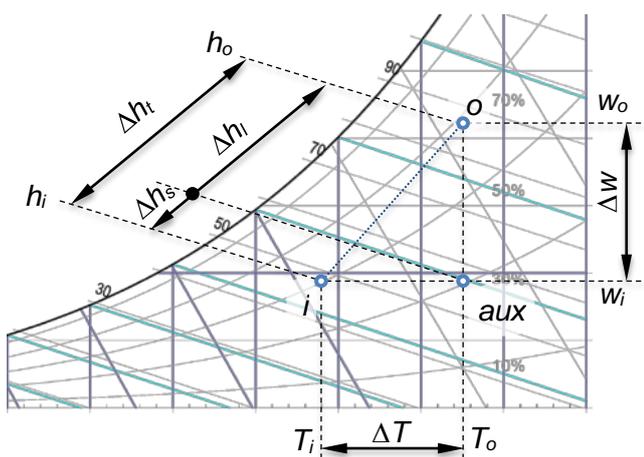


Fig. 38 Diferencias de entalpía en la ventilación (verano)

La carga total de ventilación (sensible y latente) en un instante dado es la potencia requerida para llevar el caudal másico de ventilación desde la entalpía exterior a la interior $q_v = \dot{m}_v \Delta h$, ver guía técnica IDAE [7], y tal como muestra la Fig. 38, la misma es la suma de dos componentes, una parte sensible o debida a ΔT , y una latente o debida a Δw y su valor se calcula a partir de las propiedades del aire húmedo, obtenidas de AHSRAE Fundamentals [2].

$$q_t = \dot{m}_v \Delta h_t = \dot{m}_v (\Delta h_s + \Delta h_l) \tag{ec. 15}$$

$$q_t = \dot{m}_v \{ 1.006 (T_o - T_i) + [w_o (2501 + 1.86 \cdot T_o) - w_i (2501 + 1.86 \cdot T_i)] \} \tag{ec. 16}$$

Atendiendo pues al tipo de energía, tal vez sería interesante disponer de 2 tipos de recuperadores: sensibles y latentes. Sin embargo, para la ventilación de edificios, el mercado no facilita estos últimos, ofreciendo en cambio los de tipo entálpico (ERV), que recuperan simultáneamente calor sensible y latente.

En definitiva, se dispone únicamente de dos tipos de recuperadores: los sensibles o recuperadores de calor (HRV), y los entálpicos o recuperadores de energía (ERV), y determinar cuál de los ellos es el más adecuado, es un dilema no siempre bien resuelto.

El límite de recuperación de energía de un recuperador entálpico es Δh_t , mientras que el de uno sensible es Δh_s . El hecho de que aparentemente $\Delta h_t \geq \Delta h_s$, tal y como sucede en la figura anterior, sea posiblemente el origen de la extendida creencia de que el entálpico siempre recuperará más energía que el sensible, y que si no fuera por el mayor coste siempre sería recomendable el uso de los primeros.

Ello sin embargo no pasa de ser una conclusión errónea basada en un análisis precipitado y simplista de la problemática, pues no siempre sucede que $\Delta h_t \geq \Delta h_s$. Este trabajo pone de manifiesto que, en ocasiones, el uso de un ERV puede ser desaconsejado, al suponer una pérdida de energía recuperada respecto a un HRV.

En efecto, las condiciones de la Fig. 38, era una ejemplo típico en verano para un ambiente húmedo, donde $T_o > T_i$ y $w_o > w_i$, veamos sin embargo qué pasa si ponemos un ejemplo de ambiente seco en verano, donde la humedad absoluta exterior fuera menor que la interior: $w_o < w_i$. Sería la situación que se representa sobre el diagrama psicrométrico de la Fig. 39.

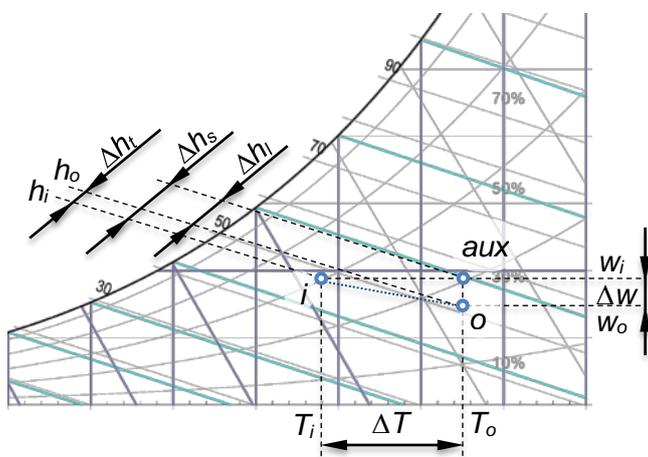


Fig. 39 Entalpías en la ventilación de un ambiente seco

En tal caso Δh_t será negativo, por lo que de acuerdo con la ec. 15, $\Delta h_t < \Delta h_s$, ya que en estas condiciones, un ERV recupera energía sensible, sin embargo pierde energía latente, resultando aparentemente menos eficiente que uno sensible.

No poder separar según convenga, la recuperación de calor sensible y latente en los ERV en ocasiones puede ser un hándicap frente a los HRV.

Básicamente ello sucederá cuando la diferencia de temperaturas ΔT y la de humedad Δw , tengan signo contrario. Se podría decir que una parte de la energía sensible ganada se contrarresta debido a la pérdida de energía latente o viceversa, y por tanto la diferencia de entalpía total es inferior a la diferencia de entalpía sensible.

$$(T_o - T_i)(w_o - w_i) = \Delta T \cdot \Delta w < 0 \Rightarrow \Delta h_t < \Delta h_s \quad \text{ec. 17}$$

Ante este ocasional cambio de signo, podría ser interesante poder recuperar de manera separada el calor sensible y el latente, y decidir de manera independiente, cuando recuperar una u otra energía, lamentablemente no es una posibilidad que ofrezcan los recuperadores entálpicos.

La Fig. 39 muestra un ejemplo en verano, en el que se dan las condiciones que originan el cambio de signo que refleja la ec. 17, pero no es la única situación en la que ello sucede, pues si miramos el diagrama psicrométrico de la Fig. 35, en que habíamos definido 6 zonas separadas por las isolíneas de temperatura, entalpía y humedad absoluta interiores, encontramos que hasta en 4 de ellas, se produce el cambio de signo indicado.

Son las zonas 1b, 2, 3b y 4, que cubren una parte importante del diagrama, lo cual significa que esta situación no se dará de forma aislada y es probable que la situación $\Delta h_t < \Delta h_s$ no se presente de forma aislada, y por tanto tenga lugar con bastante frecuencia.

La cuestión es si en estas condiciones, un recuperador entálpico efectivamente podría ahorrar menos energía que uno sensible, lo cual hasta cierto punto no dejaría de ser paradójico.

En realidad, veremos que ello no es así, y la clave de ello reside en la forma de evaluar el ahorro de energía sensible y latente de un recuperador entálpico: zonas 2 y 3b durante el verano, y las 1b y 4 durante el invierno, y es que, aunque una energía tenga signo positivo y la otra negativo, lo cierto es que ambas serían energías recuperadas y pueden suponer un ahorro energético en los equipos de climatización.

Parece obvio que siempre que una recuperación de energía pueda suponer una reducción de consumo, la misma deba computarse como ahorro, con independencia de cuál sea su signo, por lo que el potencial de recuperación de energía de un recuperador entálpico, no debe considerarse como la mera diferencia de entalpías interior y exterior, sino como la suma en valor absoluto de la diferencia de entalpía sensible y la diferencia de entalpía latente, ver ASHRAE Journal [41].

$$\Delta h_t = |\Delta h_s| + |\Delta h_l| \quad \text{ec. 18}$$

Donde

$$|\Delta h_s| = 1.006 |T_o - T_i| \quad \text{ec. 19}$$

$$|\Delta h_l| = |w_o (2501 + 1.86 \cdot T_o) - w_i (2501 + 1.86 \cdot T_i)| \quad \text{ec. 20}$$

Y por tanto

$$\Delta h_t = 1.006 |T_o - T_i| + |w_o (2501 + 1.86 \cdot T_o) - w_i (2501 + 1.86 \cdot T_i)| \quad \text{ec. 21}$$

Estas diferencias representan pues el potencial de recuperación sensible, latente y total, es decir, la máxima cantidad de energía que se podría recuperar por kg de aire de ventilación, considerando por tanto para ello una eficiencia del recuperador máxima de 1.

Estos valores resultan de notable interés, pues servirán de base para poder obtener las correspondientes potencias sensible, latente y total recuperadas, sin más que multiplicarlos por el caudal másico de aire que circula por el recuperador (kg/s) y las eficiencias (sensible, latente y total) del mismo

3.7.2. Potencia recuperada

La potencia sensible recuperada mediante el uso de un recuperador sensible se obtendrá de la expresión:

$$q_{rec_s} = \dot{m}_v |\Delta h_s| \varepsilon_s = \dot{m}_v 1.006 |T_o - T_i| \varepsilon_s \quad \text{ec. 22}$$

Mientras que la potencia total recuperada mediante el uso de un recuperador entálpico lo obtendremos de

$$q_{rec_t} = m_v [1.006 |T_o - T_i| \varepsilon_s + |w_o (2501 + 1.86 \cdot T_o) - w_i (2501 + 1.86 \cdot T_i)| \varepsilon_l] \quad \text{ec. 23}$$

Donde ε_s y ε_l son las eficiencias sensible y latente del recuperador descritas anteriormente en el apartado 2.5.2.3.

3.7.3. Energía recuperada

Para calcular la energía recuperada en las temporadas de verano y de invierno, se trataría de integrar las potencias anteriores a lo largo del período, en cuyo caso deberá considerarse que el caudal de ventilación será una variable temporal, dependiendo de la forma en que se controle la calidad de aire interior [5]:

- Constante (sin control)
- Manual
- Horario
- Señal de presencia
- Nivel de ocupación
- Sensor de calidad de aire interior (IAQ)

El objetivo de este trabajo es conocer el potencial unitario de recuperación de energía sensible o total a lo largo de un cierto periodo, para ello simplemente deberemos integrar las expresiones anteriores (ec. 22 y ec. 23), entonces debemos tener en cuenta que al caudal de ventilación será variable debido a la actuación del sistema de regulación y control sobre el mismo ver RITE [5], la estrategia de control utilizada puede dar lugar a significativas diferencias en la energía recuperada.

Además, deberemos considerar también que dicha variación de caudal afecta a las eficiencias del recuperador.

Teniendo en cuenta que disponemos de las condiciones exteriores hora a hora (considerando por tanto que las mismas son constantes durante dicho lapso de tiempo), en realidad el ahorro energético durante un cierto período R [MJ], se obtendrá a partir de los sumatorios:

$$R_s = 3600 \cdot \sum_{n=1}^N \dot{m}_{v_n} \cdot 1.006 |T_{o_n} - T_{i_n}| \varepsilon_{s_n} \quad \text{ec. 24}$$

$$R_t = 3600 \cdot \sum_{n=1}^N m_{v_n} \left[1.006 |T_{o_n} - T_{i_n}| \varepsilon_{s_n} + \left| w_{o_n} (2501 + 1.86 \cdot T_{o_n}) - w_{i_n} (2501 + 1.86 \cdot T_{i_n}) \right| \varepsilon_{t_n} \right] \quad \text{ec. 25}$$

Donde N será el número de horas que comprenda dicho periodo (8760 si lo calculamos para todo el año).

3.7.4. Potencial máximo de recuperación

En orden a evaluar el potencial máximo de recuperación unitario H [MJ/kg], de un sistema de climatización utilizando un recuperador sensible o uno entálpico, partiremos de las expresiones anteriores (ec. 24 y ec. 25), considerando en ellas una eficiencia ideal igual a 1, y un caudal másico unitario de ventilación constante cuando el sistema esté en funcionamiento y 0 cuando esté parado. (el coeficiente binario de funcionamiento δ_n valdrá 1 ó 0 respectivamente).

$$H_s = 3600 \cdot \sum_{n=1}^N \delta_n \cdot 1.006 |T_{o_n} - T_{i_n}| \quad \text{ec. 26}$$

$$H_t = 3600 \cdot \sum_{n=1}^N \delta_n \left[1.006 |T_{o_n} - T_{i_n}| + \left| w_{o_n} (2501 + 1.86 \cdot T_{o_n}) - w_{i_n} (2501 + 1.86 \cdot T_{i_n}) \right| \right] \quad \text{ec. 27}$$

Donde δ_n es el factor que tiene en cuenta si en cada hora n el recuperador está o no en funcionamiento, tomando respectivamente valor 1 ó 0. Ello dependerá de:

- el tipo de recuperador estático/entálpico,
- la estación invierno/verano
- el tipo de regulación convencional/propuesta
- la zona de recuperación (Fig. 32)

La siguiente tabla resume el valor de esta variable lógica en cada situación.

| | | | Coeficiente de funcionamiento δ_n | | | | | |
|------|-------------|-------------|--|----------|-----------------------|----------|------------------------|----------|
| | | | Recuperador Sensible | | Recuperador Entálpico | | | |
| | | | Regulac. convencional | | Regulac. convencional | | Regulación alternativa | |
| zona | $T_o - T_i$ | $h_o - h_i$ | Verano | Invierno | Verano | Invierno | Verano | Invierno |
| 1 | - | - | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 2 | - | + | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | + | + | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | + | - | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 13 Valor de δ_n según tipo de recuperador, estación, regulación y zona

3.7.5. Perfil de ocupación

El perfil de ocupación estará ligado al tipo de edificio y uso al que esté destinado, y afecta al nivel de ventilación que el mismo requiera en cada momento, por lo que incide directamente en el potencial de recuperación de energía.

Para ello bastará incorporar dentro del sumatorio de las expresiones anteriores (ec. 26 y ec. 27), el factor de ocupación $F_{ocup,n}$ descrito en el apartado 3.6.

Ello nos dará el potencial anual de recuperación de energía por kg_{as} del edificio considerando su perfil de ocupación, que comparado con el máximo indicará la reducción del potencial de ahorro existente en función de dicho perfil:

$$H_s = 3600 \cdot \sum_{n=1}^N \delta_n \cdot 1.006 |T_{o_n} - T_{i_n}| \cdot F_{ocup,n} \quad \text{ec. 28}$$

$$H_t = 3600 \cdot \sum_{n=1}^N \delta_n \left[1.006 |T_{o_n} - T_{i_n}| + \left| w_{o_n} (2501 + 1.86 \cdot T_{o_n}) - w_{i_n} (2501 + 1.86 \cdot T_{i_n}) \right| \right] \cdot F_{ocup,n} \quad \text{ec. 29}$$

Como se indicaba en el mismo apartado 3.6, resulta interesante disponer también de resultados de potencial de ahorro anual por persona. Se trataría pues de pasar de energía por unidad de masa ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{as}}$) a energía por persona ($\text{MJ}/\text{persona}$), para lo cual debemos asociar a cada una, el caudal volumétrico que, según el IDA que se indica en el RITE asociado a cada tipología de edificio.

Definiremos un factor F_{IDA} , que serán los $\text{m}^3/\text{persona}$ de ventilación que en función del IDA figuran en la Tabla 3, y faltará tan sólo y pequeño detalle de multiplicar por la densidad del aire en cada instante ρ_n [$\text{kg}_{\text{a.s.}}/\text{m}^3$].

Con todo ello obtendremos que el potencial de recuperación por persona en función del perfil de ocupación será:

$$H_s = 3600 \cdot F_{IDA} \sum_{n=1}^N \delta_n 1.006 |T_{o_n} - T_{i_n}| \cdot \rho_n \cdot F_{ocup_n} \quad \text{ec. 30}$$

$$H_t = 3600 \cdot F_{IDA} \sum_{n=1}^N \delta_n \left[1.006 |T_{o_n} - T_{i_n}| + |w_{o_n} (2501 + 1.86 \cdot T_{o_n}) - w_{i_n} (2501 + 1.86 \cdot T_{i_n})| \right] \cdot \rho_n \cdot F_{ocup_n} \quad \text{ec. 31}$$

En todo caso remarcar nuevamente que las anteriores ecuaciones facilitan el máximo potencial de ahorro existente, son por tanto aproximaciones ideales donde no se consideran algunas pérdidas o consumos de energía secundarios, como serían el consumo eléctrico adicional que el recuperador ocasiona, o las relacionadas con la formación de hielo, ver ASHRAE Journal [41].

Por lo que afecta al consumo adicional que ocasiona el recuperador, aunque pueda ser apreciable en términos absolutos, es relativamente pequeño en comparación con el ahorro de energía proporcionado, y además es de un orden similar tanto para el recuperador sensible como para el entálpico trabajando en las mismas condiciones, por lo que la diferencia de consumo entre uno y otro tipo vendrá marcada por las diferentes horas de funcionamiento que pueda haber entre ambos, y como se ha visto en el apartado 3.5 este valor es muy pequeño.

En relación a las pérdidas debidas a la formación de hielo, también se ha puesto de manifiesto en el apartado 3.2.2, que las mismas sólo tienen lugar en condiciones extremas de invierno, las cuales no se presentan habitualmente en la península. Por tanto, la diferencia de potencial de energía ahorrada entre un recuperador entálpico y uno sensible definida como $\Delta H_{ts} = H_t - H_s$ no se ve afectada por esta suposición.

Como conclusión, es importante puntualizar que los términos en que se expresan estas ecuaciones, definen el potencial de ahorro energético, esto es, el máximo valor que puede alcanzarse si el recuperador es ideal, y aplicando las consideraciones previamente descritas.

3.7.6. Validación de la formulación

En orden a verificar que el modelo y formulación utilizada en este trabajo, para realizar los cálculos y obtener los resultados aquí mostrados, previamente se han utilizado como referencia para corroborar los resultados presentados por Guillén-Lambea et al. [25], en cuyo estudio investigaron en diversos casos sobre el potencial de ahorro energético en la ventilación mediante recuperadores de calor en climatización. Se pudieron reproducir los resultados de estos autores utilizando sus mismas condiciones de contorno y parámetros, con pequeñas desviaciones que en ningún caso superaban el 2,4 %.

3.8. Procedimiento

Se realizará una simulación a lo largo de todo el año, mediante las ecuaciones formuladas en el apartado anterior considerando para ello intervalos de una hora, aplicándolo tanto a recuperadores sensibles como entálpicos.

La diferencia de potencial de recuperación de energía entra ambos dispositivos ΔH_{ts} , se obtendrá para la temporada de verano, para la de invierno y también el valor global a lo largo de todo el año.

Los cálculos se realizan para todas y cada una de las ciudades consideradas en el área geográfica objeto de estudio, en este caso España, partiendo de las condiciones climáticas de cada una de ellas.

Los resultados obtenidos serán llevados a un mapa, para representar de forma gráfica mediante curvas de nivel. Se trata de una herramienta visual que facilita el análisis de los resultados y pretende ayudar en la toma de decisiones sobre el tipo de recuperador a utilizar en cada caso, pues los recuperadores entálpicos estarán especialmente recomendados en aquellas zonas con elevados valores de ΔH_{ts} , mientras que serán los sensibles aquellos que convenga instalar si dicho valor es discreto o reducido.

Dado que todo ello supone gestionar una gran cantidad de información, con numerosas variables psicrométricas para cada ciudad, hora a hora a lo largo del año, nos hemos decantado por programar la simulación en Visual Basic mediante macros sobre una hoja de cálculo (Excel®), por la facilidad, así como la enorme agilidad que ofrece en la gestión de una base de datos como la que debe utilizarse, nos hemos.

Ello además ofrece una inmediatez visual de resultados, en un formato que además resulta muy práctico para exportarlos a la herramienta utilizada para la representación de los mismos mediante curvas de nivel sobre el mapa.

3.8.1. Condiciones interiores y exteriores

Los cálculos se realizan para todas y cada una de las ciudades consideradas en el área geográfica objeto de estudio, en este caso España, partiendo de las condiciones climáticas de cada una de ellas, ver apartado 3.3.1.

Las condiciones interiores (temperatura y humedad relativa) consideradas han sido 21 °C y 40% de humedad en época de invierno y 24 °C y 50 % durante la época de verano.

Se ha de precisar que, si bien se han establecido estas condiciones interiores de temperatura y humedad tanto en invierno como en verano, es un hecho que con frecuencia en los edificios

tan sólo se establece la consigna para regular la temperatura, y no siempre la humedad relativa está controlada y se deja con total libertad de fluctuación.

La pregunta sería entonces, en qué medida afecta este hecho a los resultados del estudio, es decir, ¿qué sucede con el potencial de ahorro de energía en el caso de que no disponer de control de humedad?

La respuesta desde un punto de vista cualitativo es sencilla, pues es evidente que si la humedad relativa interior no se regula y puede fluctuar, el valor de la humedad absoluta interior será más próximo al de la humedad absoluta exterior, y por tanto disminuye la recuperación de energía latente.

Ello supone que disminuye la ventaja del potencial de ahorro del recuperador entálpico frente al sensible, la pregunta ahora sería ¿en qué magnitud?

3.8.2. Sobre el control de humedad

Si no hay control de humedad en un edificio, el valor de la misma irá variando dependiendo especialmente de dos aspectos:

- de la ventilación y las condiciones del ambiente exterior
- de las cargas latentes interiores y el factor de calor sensible interior (FCSi).

Es bien conocido por ejemplo que en zonas de elevada humedad en verano y/o con elevadas cargas latentes interiores, si no hay control de humedad interior, la misma será mayor que las de confort. De igual modo en invierno, con las habituales bajas humedades absolutas exteriores y/o baja carga latente interior la humedad relativa interior podría caer de forma significativa.

A nivel práctico, esta dependencia específica de las condiciones interiores (humedad) con la carga latente interior y el FCSi, suponen que no pueden generalizarse los resultados del estudio, y se requiere que el mismo se realice de manera específica para cada edificio.

No obstante, no podemos renunciar a dar alguna respuesta a esta problemática, y trataremos de analizarlo, pues aún en el caso de no existir control de humedad en el edificio, a nivel práctico, el adecuado dimensionado del sistema de climatización, ya de por sí debería ser suficiente para que la fluctuación de humedad no permita que la humedad relativa se aleje excesivamente del valor previsto en el diseño.

Por otro lado resulta evidente que precisamente cuando el mero diseño y funcionamiento normal de la instalación, no sea suficiente para asegurar que las condiciones termohigrométricas de confort, estén dentro de los límites de la normativa (Tabla 1), es

precisamente en estos casos donde se hace necesario dotar a la instalación de un sistema de regulación de humedad para garantizar las condiciones de confort.

Debe considerarse además que, más allá de las condiciones de confort, una humedad relativa excesivamente baja en un edificio puede incluso dar lugar a problemas de salud en los usuarios, seguramente el más estudiado sea el de la lipoatrofia semicircular, que entran dentro de lo que se conoce como síndrome del edificio enfermo, relacionado por primera vez con edificios en 1974, ver Gschwandtner WR, Münzberger H. [46].

Esta enfermedad se hizo especialmente célebre en nuestro país en 2007, debido al brote que surgió en un edificio de nueva construcción de Gas Natural en la ciudad de Barcelona, y se asocia especialmente a humedades relativas muy bajas, que en presencia de mobiliario y estructura metálica favorece la aparición de pequeñas descargas electrostáticas.

Por lo expuesto vamos a estudiar también lo que sucede cuando la humedad relativa no está controlada y puede fluctuar libremente en función de las condiciones, dentro de una cierta horquilla, fuera de cuyos límites se considerará que sería ya necesaria la presencia de un sistema de control de humedad.

3.8.2.1. Límite de fluctuación según condiciones de confort RITE

Respecto a los valores de dicha horquilla, nos guiaremos por los límites que establece la reglamentación en cuanto al diseño de instalaciones, ya recogidos en la Tabla 1, esto es: entre el 45 y el 60 % para las condiciones de verano, y entre el 40 y el 50 % en condiciones de invierno.

3.8.2.2. Límite de fluctuación según condiciones de confort RITE extendidas

En cualquier caso, hay que ser consciente a nivel práctico, que la problemática que habitualmente se presenta en verano es la de tener valores por encima del 60 % en verano, y que por tanto en esta época no tiene demasiado sentido aplicar un límite inferior del 45 %, el cual podría extenderse a valores por debajo del mismo. Sucede algo similar en invierno, en que la problemática es la de tener valores excesivamente bajos por debajo del 40%, no siendo en absoluto habitual que en esta época la humedad suba por encima del límite superior del 50 %, lo cual ni siquiera representaría un mayor problema, por lo que también podría extenderse este límite a valores superiores.

3.8.3. Criterio para el cambio de temporada Verano/Invierno

No se ha encontrado un criterio aceptado universalmente, que defina en qué momento del año se decide poner en marcha los sistemas de refrigeración o calefacción, dando así inicio respectivamente a las temporadas de verano e invierno.

Obviamente, sería un error caer en la simple aproximación de estas temporadas, como un conjunto de meses preestablecido, pues en la práctica, el cambio de consigna dependerá de cómo evolucione la climatología exterior, de las características y del uso del edificio (cargas internas), aunque no existe definido por tanto un criterio universal a seguir.

En todo caso resulta lógico que, debido a las cargas internas, habitualmente se suele considerar un cierto diferencial mínimo de temperaturas entre interior y también parece razonable que no se considere poner inmediatamente en marcha los equipos de climatización, cuando de forma esporádica se alcance una cierta temperatura, sino que habitualmente se esperará una cierta continuidad de bajas temperaturas en invierno, o altas en verano, para dar por iniciada cada una de esas temporadas.

No es objetivo de este trabajo el de entrar en un debate acerca del criterio para el cambio de temporada, ni mucho pretender definir del mismo. Tan sólo se ha considerado uno, al objeto de poder cuantificar el potencial de ahorro de los recuperadores, si bien resultará muy sencillo modificar el mismo en la simulación realizada.

En este sentido, se han realizado numerosas simulaciones con diferentes criterios, y concretando finalmente, se ha considerado razonable que tenga lugar un mínimo de 3 días consecutivos con temperatura media más allá de un diferencial de 4 °C, ver normativa [39], esto es: $\bar{T}_o \leq T_i - \Delta T = 20 - 4 = 16$ °C para considerar que se inicia la temporada de invierno, o $\bar{T}_o \geq T_i - \Delta T = 24 - 4 = 20$ °C para considerar el inicio de la de verano.

Como indicamos este criterio es fácilmente modificable en el modelo, y de hecho antes de decantarnos por él se han realizado numerosas simulaciones.

4. Resultados

Siguiendo los criterios indicados en la metodología, y utilizando las expresiones de la formulación anterior, se ha contabilizado el potencial de ahorro energético que podrían alcanzar ambos tipos de recuperadores, lo cual se evaluará por separado para las temporadas de verano, de invierno, siendo la suma el potencial de recuperación energética anual.

4.1. Leyendas de los mapas de resultados

Tendremos dos tipos de mapas: unos que muestran valores del potencial de recuperación y otros que muestran la diferencia entre el potencial entálpico y el sensible.

Para facilitar el análisis de resultados, para los mapas del primer tipo: potenciales de recuperación sensible y entálpico, en la temporada de verano, de invierno, y anual (H_{s_inv} , H_{t_inv} , H_{s_ver} , H_{t_ver} , H_s , H_t), utilizaremos para todos ellos la misma leyenda de la tabla adjunta.

| Zona | Color | H (GJ/kg _{as}) | |
|------|-------|----------------------------|------|
| | | Min. | Max. |
| 1 | | 0 | 30 |
| 2 | | 30 | 60 |
| 3 | | 60 | 90 |
| 4 | | 90 | 120 |
| 5 | | 120 | 150 |
| 6 | | 150 | 180 |
| 7 | | 180 | 210 |
| 8 | | 210 | 240 |
| 9 | | 240 | 270 |
| 10 | | 270 | 300 |
| 11 | | 300 | 330 |
| 12 | | 330 | 360 |
| 13 | | 360 | 390 |
| 14 | | 390 | 420 |
| 15 | | 420 | 450 |

Tabla 14 Leyenda potenciales de recuperación: H

En cambio, en el conjunto de mapas que muestran la diferencia de potencial entre recuperadores entálpicos y sensibles ERV vs HRV mapas: $\Delta H_{ts} = H_t - H_s$, (ΔH_{ts_inv} , ΔH_{ts_ver} , ΔH_{ts}), pueden aparecer zonas con valores negativos y zonas con valores positivos, por lo que utilizaremos una leyenda diferente, como la mostrada en la siguiente Tabla 15.

| Zona | Color | ΔH_{ts} (GJ/kg _{as}) | | Comentario | Recomendación HRV or ERV |
|------|-------|--|------|-------------------------|--|
| | | Min. | Max. | | |
| -2 | | -15 | -25 | > ventaja de HRV vs ERV | HVR |
| -1 | | -15 | -5 | | |
| 0 | | -5 | 5 | < ventaja de ERV vs HRV | > Probabilidad HRV según costes > Probabilidad ERV |
| 1 | | 5 | 15 | | |
| 2 | | 15 | 25 | | |
| 3 | | 25 | 35 | | |
| 4 | | 35 | 45 | | |
| 5 | | 45 | 55 | | |
| 6 | | 55 | 65 | | |
| 7 | | 65 | 75 | | |
| 8 | | 75 | 85 | | |
| 9 | | 85 | 95 | | |
| 10 | | 95 | 105 | | |
| 11 | | 105 | 115 | | |
| 12 | | 115 | 125 | | |
| 13 | | 125 | 135 | > ventaja de ERV vs HRV | |
| 14 | | 135 | 145 | | |

Tabla 15 Leyenda comparativa del potencial de recuperación entre ERV y HRV: ΔH

En aquellas zonas en que la diferencia sea muy reducida, o incluso negativa, la recomendación sería instalar recuperadores sensibles (HRV), pues no tiene sentido instalar recuperadores entálpicos (ERV) ya que probablemente ello no compensará el mayor coste de los ERV frente a los HRV. Ello también es aplicable a las zonas ligeramente positivas, pues en ellas el aumento de energía recuperada por un recuperador entálpico es reducido. Únicamente en zonas donde la diferencia sea positiva y tenga un elevado valor, será recomendable utilizar un ERV frente a un HRV.

4.2. Potencial máximo de recuperación (regulación. Convenc.)

Mostraremos en primer lugar los resultados del potencial de recuperación de energía existente, para las épocas de verano, de invierno y anual, considerando que los recuperadores entálpicos están regulados siguiendo el criterio tradicional.

A modo de ejemplo, la siguiente tabla muestra el resumen de los resultados obtenidos para algunas ciudades destacadas, considerando un edificio con ocupación permanente

| Ciudad | Invierno | | | Verano | | | Anual | | |
|--------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|--------------|----------------------|---------------|---------------|-----------------|
| | H_{t_inv} | H_{s_inv} | ΔH_{ts_inv} | H_{t_ver} | H_{s_ver} | ΔH_{ts_ver} | H_t | H_s | ΔH_{ts} |
| Albacete | 338984 | 249396 | 89587 | 13820 | 16261 | -2440 | 352804 | 265657 | 87147 |
| Alicante | 139970 | 117158 | 22812 | 102679 | 19821 | 82858 | 242649 | 136979 | 105670 |
| Almería | 109389 | 94925 | 14464 | 108161 | 19934 | 88227 | 217550 | 114859 | 102691 |
| Ávila | 468394 | 321951 | 146444 | 0 | 1904 | -1904 | 468394 | 323855 | 144539 |
| Badajoz | 198161 | 165856 | 32305 | 36145 | 27189 | 8956 | 234306 | 193046 | 41261 |
| Barcelona | 211809 | 176994 | 34816 | 64390 | 6568 | 57821 | 276199 | 183562 | 92637 |
| Bilbao | 240433 | 198963 | 41470 | 18775 | 1972 | 16803 | 259208 | 200935 | 58273 |
| Burgos | 436977 | 331992 | 104985 | 1205 | 1049 | 156 | 438182 | 333041 | 105140 |
| Cáceres | 219013 | 180238 | 38775 | 22025 | 25100 | -3075 | 241038 | 205338 | 35700 |
| Cádiz | 108199 | 90052 | 18147 | 112268 | 9944 | 102324 | 220467 | 99997 | 120471 |
| Castellón | 176801 | 141725 | 35077 | 86649 | 13675 | 72974 | 263450 | 155399 | 108051 |
| Ciudad Real | 288469 | 223690 | 64778 | 25020 | 22319 | 2701 | 313489 | 246009 | 67480 |
| Córdoba | 171646 | 142647 | 28998 | 53391 | 35755 | 17636 | 225037 | 178403 | 46634 |
| Cuenca | 375680 | 274212 | 101469 | 1524 | 10874 | -9350 | 377205 | 285086 | 92119 |
| Gerona | 266920 | 215333 | 51587 | 29620 | 8776 | 20844 | 296540 | 224109 | 72431 |
| Granada | 271262 | 206699 | 64563 | 17036 | 23333 | -6298 | 288298 | 230032 | 58266 |
| Guadalajara | 300989 | 235705 | 65284 | 17253 | 14047 | 3207 | 318242 | 249752 | 68491 |
| Huelva | 121917 | 101241 | 20677 | 58906 | 21379 | 37527 | 180823 | 122619 | 58204 |
| Huesca | 311375 | 240279 | 71097 | 11580 | 11262 | 318 | 322956 | 251541 | 71415 |
| Jaén | 207666 | 169123 | 38543 | 48517 | 31593 | 16924 | 256183 | 200716 | 55467 |
| La Coruña | 220144 | 187443 | 32701 | 339 | 45 | 294 | 220482 | 187487 | 32995 |
| León | 423522 | 307424 | 116098 | 1775 | 2866 | -1091 | 425297 | 310290 | 115007 |
| Lérida | 272700 | 211701 | 60999 | 24409 | 16066 | 8343 | 297109 | 227767 | 69342 |
| Logroño | 310335 | 236004 | 74331 | 10182 | 8658 | 1524 | 320517 | 244662 | 75855 |
| Lugo | 344547 | 287847 | 56700 | 299 | 105 | 194 | 344846 | 287952 | 56894 |
| Madrid | 302206 | 218993 | 83213 | 2893 | 14427 | -11534 | 305099 | 233421 | 71679 |
| Málaga | 121607 | 104355 | 17252 | 73467 | 16963 | 56504 | 195074 | 121318 | 73756 |
| Murcia | 157824 | 134958 | 22866 | 108013 | 11801 | 96212 | 265836 | 146758 | 119078 |
| Orense | 243569 | 206953 | 36616 | 14737 | 9624 | 5113 | 258306 | 216577 | 41729 |
| Oviedo | 291655 | 242958 | 48698 | 3084 | 133 | 2951 | 294739 | 243090 | 51648 |
| Palencia | 360597 | 280829 | 79769 | 3888 | 3172 | 717 | 364486 | 284000 | 80485 |
| P. Mallorca | 141168 | 121782 | 19387 | 122154 | 14313 | 107841 | 263322 | 136095 | 127227 |
| Pamplona | 337765 | 261539 | 76226 | 2737 | 2847 | -110 | 340502 | 264387 | 76116 |
| Pontevedra | 194098 | 167788 | 26310 | 6592 | 2780 | 3812 | 200690 | 170568 | 30122 |
| Salamanca | 370317 | 282072 | 88245 | 3191 | 5012 | -1821 | 373508 | 287084 | 86424 |
| S. Sebastián | 266881 | 226254 | 40627 | 16344 | 183 | 16160 | 283225 | 226438 | 56787 |
| Santander | 228329 | 191582 | 36747 | 13095 | 221 | 12874 | 241424 | 191803 | 49622 |
| Segovia | 391687 | 286037 | 105650 | 2992 | 6145 | -3152 | 394679 | 292182 | 102497 |
| Sevilla | 137040 | 118153 | 18887 | 61278 | 36218 | 25060 | 198318 | 154372 | 43946 |

| Ciudad | Invierno | | | Verano | | | Anual | | |
|-------------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|--------------|----------------------|---------------|---------------|-----------------|
| | H_{t_inv} | H_{s_inv} | ΔH_{ts_inv} | H_{t_ver} | H_{s_ver} | ΔH_{ts_ver} | H_t | H_s | ΔH_{ts} |
| Soria | 444485 | 320484 | 124000 | 2802 | 3437 | -634 | 447287 | 323921 | 123366 |
| Tarragona | 178318 | 141222 | 37096 | 74976 | 19670 | 55306 | 253294 | 160891 | 92402 |
| Teruel | 417425 | 293885 | 123540 | 5937 | 6691 | -754 | 423362 | 300575 | 122786 |
| Toledo | 260129 | 199588 | 60541 | 34044 | 27195 | 6849 | 294172 | 226783 | 67390 |
| Valencia | 182006 | 143152 | 38854 | 84452 | 12308 | 72144 | 266458 | 155460 | 110998 |
| Valladolid | 354328 | 271668 | 82660 | 2417 | 7923 | -5506 | 356745 | 279591 | 77155 |
| Vitoria | 366592 | 290337 | 76255 | 466 | 322 | 143 | 367057 | 290659 | 76398 |
| Zamora | 347333 | 260440 | 86893 | 2257 | 7772 | -5516 | 349590 | 268212 | 81377 |
| Zaragoza | 274777 | 210875 | 63902 | 21939 | 15279 | 6660 | 296716 | 226154 | 70562 |
| MAXIMO | 468394 | 331992 | 146444 | 122154 | 36218 | 107841 | 468394 | 333041 | 144539 |
| MINIMO | 108199 | 90052 | 14464 | 0 | 45 | -11534 | 180823 | 99997 | 30122 |

Tabla 16 Potencial máximo de ahorro anual con regulación tradicional (MJ/kg_{as})

Para facilitar el análisis, y poder relacionarlos con la climatología de la región en que se ubica cada ciudad, los resultados de estas 6 columnas se han llevado a unos mapas, que mostrarán gráficamente curvas de nivel, aquellas zonas geográficas con mayor o menor potencial de ahorro de energía en la ventilación H , según se opte por utilizar un recuperador sensible o uno latente.

Para tener una información más clara de cual de ambos recuperadores es más interesante, se realiza el mapa con la diferencia de potenciales de recuperación entre ambos tipos de recuperador ΔH .

4.2.1. Mapas de potencial de recuperación máxima en verano

VERANO: comparativa recuperador entálpico vs. Recuperador sensible (ERV vs. HRV)

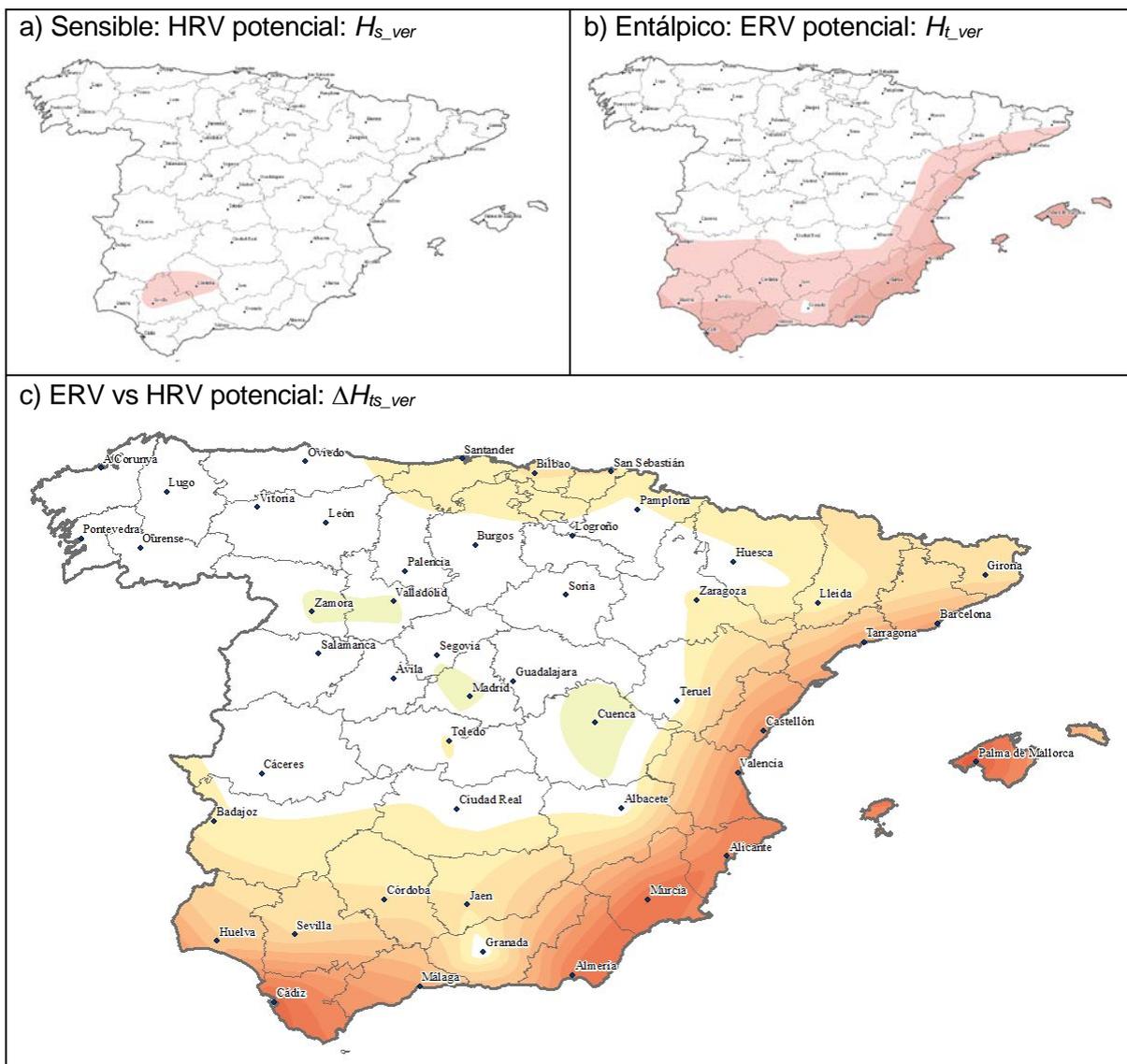


Fig. 40 Potencial de recuperación Verano: H_{s_ver} , H_{t_ver} , ΔH_{ts_ver}

La figura anterior muestra en verano, mapas con un escaso potencial de recuperación de energía sensible (a) y entálpica (b), pues en ambos casos la práctica totalidad del país está en zona de valores mínimos. En cuanto a la energía sensible, tan sólo en una pequeña zona del sur se supera ligeramente este valor, alcanzando un máximo de tan sólo 36000 MJ/kg_{as}, mientras que, respecto a la energía entálpica, únicamente en una estrecha franja próxima a las zonas costeras del Sur y Sudeste presentan una cierta mejora que apenas llega puntualmente a los 122000 MJ/kg_{as} anuales.

Lógicamente, si miramos el mapa de comparativa (c), se observa que es en estas mismas zonas costeras, donde más recuperarían los ERV frente a los HRV, pero incluso en ellas los valores son muy reducidos, y en la mayor parte del país está en zona neutra, e incluso hay zonas en el interior ligeramente negativas.

En definitiva, los resultados durante el verano, indican que en la práctica totalidad del país resulta aconsejable instalar HRV, pues incluso en aquellas zonas puntuales con mayor potencial de ahorro entálpico, éste es reducido y probablemente no se llegue a amortizar.

Este resultado es muy interesante, pues contradice la percepción que se tiene en general, y de forma particular en España, donde se indica que el uso de recuperadores entálpicos está especialmente recomendado en zonas con elevadas humedades en verano, poniendo con frecuencia como ejemplo la ciudad de Barcelona, la cual presenta una discreta ventaja potencial de 57800 MJ/kgas anuales de los ERV frente a los HRV.

4.2.2. Mapas de potencial de recuperación máxima en invierno

INVIERNO: comparativa recuperador entálpico vs. recuperador sensible (ERV vs. HRV)

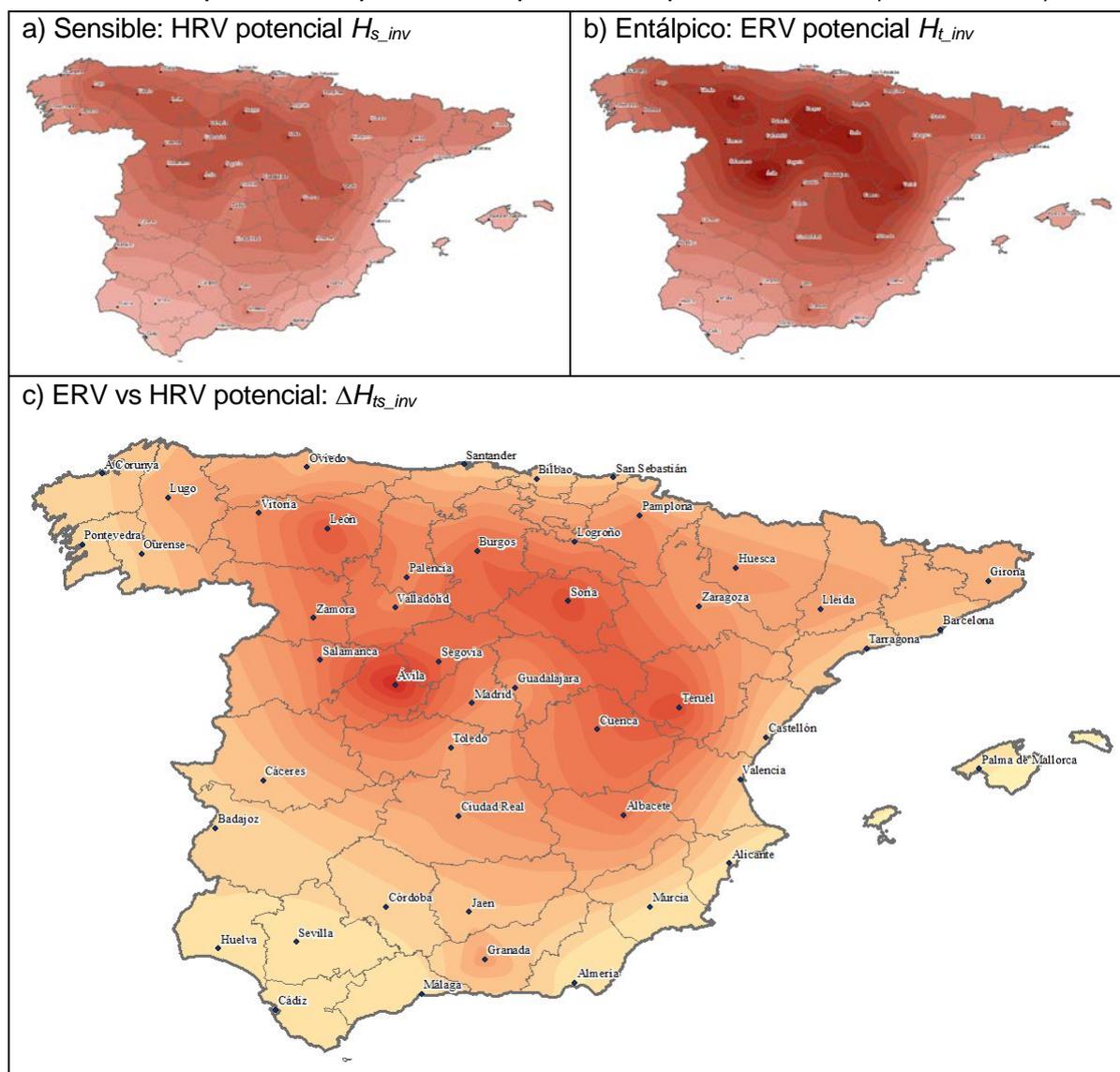


Fig. 41 Potencial de recuperación Invierno: H_{s_inv} , H_{t_inv} , ΔH_{ts_inv}

Los mapas para invierno de potencial de recuperación máxima sensible Fig. 41a) y entálpica Fig. 41b), muestran una distribución similar de zonas, pero a diferencia de lo que sucedía en verano, el potencial de recuperación es notablemente mayor, por lo que será esta temporada de invierno la que marcará de manera predominante los resultados anuales anual.

Si nos centramos en el mapa comparativo ERV vs HRV Fig. 41c), se observa que los valores de ΔH_{ts_inv} , salvo en un par de pequeñas zonas con valores negativos al sur y al noroeste, en el resto del país presenta valores positivos.

Aparecen zonas con una marcada ventaja del potencial de recuperación entálpica frente al sensible, las cuales se ubican especialmente en las regiones más frías del interior de la mitad norte, donde se alcanzan valores máximos de ΔH_{ts_inv} de hasta 145000 MJ/kg_{as} anuales.

4.2.3. Mapas de potencial de recuperación máxima anual

Veamos finalmente los resultados obtenidos para todo el año

AÑO: comparativa recuperador entálpico vs. recuperador sensible (ERV vs. HRV)

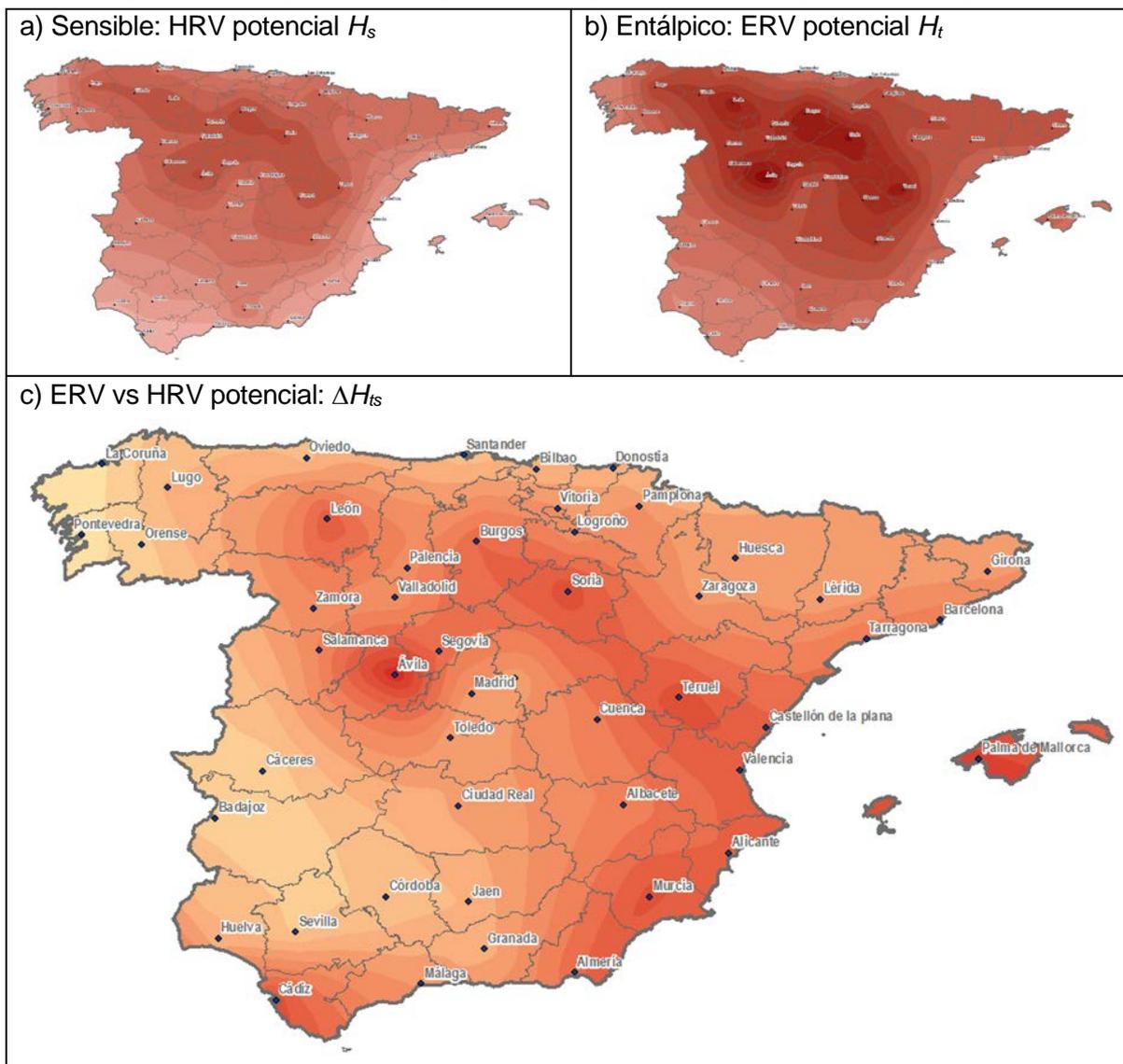


Fig. 42 Potencial de recuperación Anual: H_s , H_t , ΔH_{ts}

Respecto a los mapas anuales de potencial de recuperación Fig. 42a) y Fig. 42b), tan sólo indicar que presentan unas zonas muy similares a las que aparecen en los de invierno Fig.

41a y Fig. 41b), si bien ofrece valores algo mayores, dado que incluye también el potencial de la temporada de verano.

En relación al mapa comparativo ERV vs HRV (Fig. 42c), los resultados no dejan de ser un tanto sorprendentes, pues muestra que las zonas costeras, de elevada humedad en verano, no son en absoluto, aquellas donde más aconsejable sea instalar un ERV.

Es en el interior de la mitad norte del país donde se tienen las zonas con mayor ventaja de los ERV frente a los HRV, alcanzando una mejora en el potencial de recuperación de casi 145000 MJ/kg anuales.

4.3. Regulación Alternativa de recuperadores entálpicos

La siguiente tabla muestra un resumen de los resultados obtenidos para algunas ciudades destacadas, tanto de aumento de tiempo de funcionamiento, como de incremento del potencial de energía recuperada i el valor absoluto de ésta conseguido en kJ/(kg año).

| Población | ΔH_t (alternativa-tradicional) | | | H_t alternativa | | | Incremento | |
|-------------|--|---------------------|--------------|-------------------|--------------|--------|------------|--------------|
| | ΔH_{t_inv} | ΔH_{t_ver} | ΔH_t | H_{t_inv} | H_{t_ver} | H_t | Horas | % ΔH |
| Albacete | 51 | 6885 | 6937 | 339035 | 20706 | 359741 | 561 | 1,97 |
| Alicante | 1544 | 104 | 1648 | 141514 | 102783 | 244297 | 205 | 0,68 |
| Almería | 2038 | 0 | 2038 | 111426 | 108161 | 219588 | 278 | 0,94 |
| Ávila | 0 | 8418 | 8418 | 468394 | 8418 | 476813 | 199 | 1,80 |
| Badajoz | 663 | 2094 | 2756 | 198824 | 38239 | 237063 | 469 | 1,18 |
| Barcelona | 2166 | 0 | 2166 | 213975 | 64390 | 278365 | 261 | 0,78 |
| Bilbao | 2492 | 0 | 2492 | 242925 | 18775 | 261700 | 334 | 0,96 |
| Burgos | 652 | 248 | 900 | 437629 | 1453 | 439082 | 165 | 0,21 |
| Cáceres | 142 | 9890 | 10032 | 219156 | 31915 | 251070 | 906 | 4,16 |
| Cádiz | 5555 | 0 | 5555 | 113754 | 112268 | 226022 | 552 | 2,52 |
| Castello | 1716 | 4 | 1720 | 178517 | 86653 | 265170 | 224 | 0,65 |
| Ciudad Real | 18 | 5805 | 5824 | 288487 | 30826 | 319313 | 472 | 1,86 |
| Córdoba | 1039 | 2354 | 3394 | 172685 | 55745 | 228430 | 434 | 1,51 |
| Cuenca | 14 | 12328 | 12343 | 375694 | 13853 | 389547 | 661 | 3,27 |
| Gerona | 1665 | 3 | 1669 | 268586 | 29623 | 298209 | 197 | 0,56 |
| Granada | 7 | 10880 | 10887 | 271269 | 27915 | 299184 | 753 | 3,78 |
| Guadalajara | 1117 | 1610 | 2726 | 302106 | 18863 | 320968 | 371 | 0,86 |
| Huelva | 2485 | 232 | 2718 | 124403 | 59138 | 183541 | 403 | 1,50 |
| Huesca | 19 | 3981 | 4000 | 311394 | 15561 | 326956 | 322 | 1,24 |
| Jaén | 801 | 3353 | 4154 | 208466 | 51870 | 260337 | 574 | 1,62 |
| La Coruña | 5537 | 0 | 5537 | 225681 | 339 | 226020 | 621 | 2,51 |
| León | 166 | 2083 | 2249 | 423688 | 3858 | 427545 | 193 | 0,53 |
| Lérida | 136 | 1421 | 1556 | 272836 | 25830 | 298665 | 190 | 0,52 |

| Población | ΔH_t (alternativa-tradicional) | | | H_t alternativa | | | Incremento | |
|--------------|--|---------------------|--------------|-------------------|--------------|--------|------------|--------------|
| | ΔH_{t_inv} | ΔH_{t_ver} | ΔH_t | H_{t_inv} | H_{t_ver} | H_t | Horas | % ΔH |
| Logroño | 668 | 1807 | 2475 | 311003 | 11988 | 322992 | 316 | 0,77 |
| Lugo | 4924 | 0 | 4924 | 349471 | 299 | 349769 | 456 | 1,43 |
| Madrid | 20 | 17782 | 17802 | 302226 | 20675 | 322901 | 919 | 5,83 |
| Málaga | 1215 | 383 | 1598 | 122822 | 73850 | 196672 | 269 | 0,82 |
| Murcia | 981 | 0 | 981 | 158805 | 108013 | 266818 | 177 | 0,37 |
| Orense | 1247 | 262 | 1509 | 244816 | 14999 | 259815 | 266 | 0,58 |
| Oviedo | 6836 | 0 | 6836 | 298491 | 3084 | 301574 | 605 | 2,32 |
| Palencia | 858 | 735 | 1593 | 361455 | 4624 | 366079 | 235 | 0,44 |
| P. Mallorca | 3038 | 0 | 3038 | 144206 | 122154 | 266360 | 383 | 1,15 |
| Pamplona | 502 | 1201 | 1703 | 338268 | 3938 | 342205 | 249 | 0,50 |
| Pontevedra | 2171 | 50 | 2221 | 196269 | 6642 | 202911 | 314 | 1,11 |
| Salamanca | 399 | 4300 | 4699 | 370716 | 7491 | 378207 | 331 | 1,26 |
| S. Sebastián | 7618 | 0 | 7618 | 274499 | 16344 | 290842 | 619 | 2,69 |
| Santander | 2965 | 0 | 2965 | 231294 | 13095 | 244389 | 442 | 1,23 |
| Segovia | 51 | 7009 | 7060 | 391737 | 10002 | 401739 | 429 | 1,79 |
| Sevilla | 1037 | 1703 | 2739 | 138076 | 62981 | 201057 | 412 | 1,38 |
| Soria | 85 | 1757 | 1842 | 444569 | 4560 | 449129 | 185 | 0,41 |
| Tarragona | 551 | 321 | 872 | 178869 | 75297 | 254166 | 152 | 0,34 |
| Teruel | 57 | 3312 | 3369 | 417482 | 9249 | 426730 | 251 | 0,80 |
| Toledo | 146 | 4786 | 4932 | 260274 | 38830 | 299104 | 583 | 1,68 |
| Valencia | 218 | 3 | 222 | 182224 | 84455 | 266679 | 58 | 0,08 |
| Valladolid | 131 | 8255 | 8385 | 354459 | 10672 | 365131 | 495 | 2,35 |
| Vitoria | 1611 | 99 | 1709 | 368202 | 564 | 368767 | 260 | 0,47 |
| Zamora | 50 | 7871 | 7921 | 347383 | 10127 | 357510 | 463 | 2,27 |
| Zaragoza | 277 | 1633 | 1910 | 275054 | 23571 | 298625 | 280 | 0,64 |

Tabla 17 Regulación convencional vs Regulación alternativa propuesta

Si bien el número de horas de funcionamiento adicional que en muchas ciudades ofrece la regulación alternativa de los recuperadores entálpicos (penúltima columna de la tabla anterior), lo parece apuntar a un incremento muy significativo del ahorro anual, lo cierto es que si miramos los porcentajes de incremento que muestra la última columna, los mismos, aunque positivos, podrían catalogarse en general como discretos, siendo el máximo el que se alcanza en Madrid con casi un 6 % de anual.

Vamos a trasladar a los mapas las columnas de potencial de ahorro que se conseguirían en los recuperadores entálpicos con la regulación alternativa propuesta.

4.3.1. Mapas de potencial máximo de recuperación con regulación alternativa

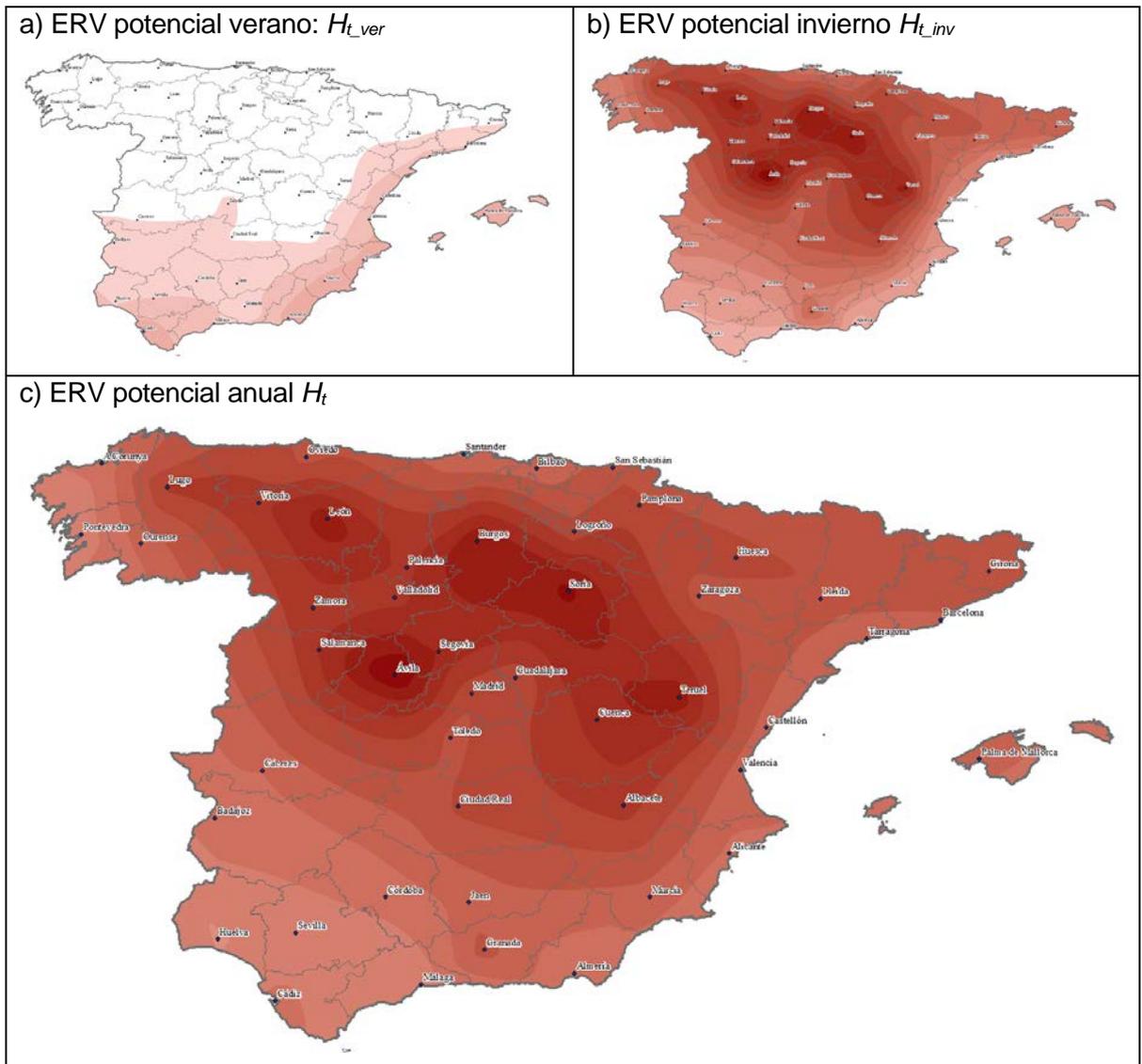


Fig. 43 Potencial de recuperación entálpica con regulación alternativa: H_{t_ver} , H_{t_inv} , H_t

A continuación, llevaremos a un mapa la diferencia porcentual entre la recuperación de entalpía H_t con el sistema de regulación tradicional y con el alternativo propuesto.

4.3.2. Regulación alternativa vs regulación convencional

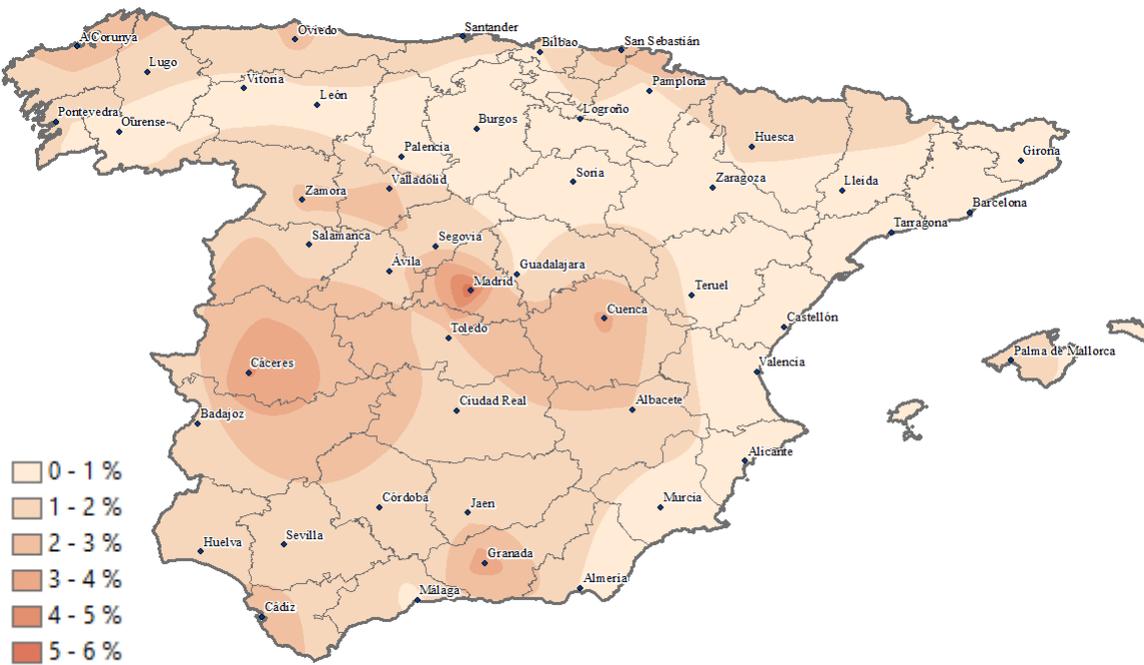


Fig. 44 Variación % potencial de recuperación anual: regulación tradicional vs alternativa.

Se puede apreciar que el mapa ofrece una distribución más o menos dispersa, que no permite extraer un criterio claro, de las zonas geográficas en que la regulación alternativa se traduce en un mayor incremento de recuperación de energía.

Los valores porcentuales de la mejora son relativamente discretos y se sitúan por debajo del 6 % en todos los casos.

No obstante, cabe indicar que cambiar el criterio de regulación y control en sobre un recuperador entálpico, no supone coste alguno, y siempre permitiría mejorar en alguna medida la energía recuperada por el mismo, por lo que independientemente de la magnitud de la mejora siempre tendría sentido utilizar la regulación alternativa propuesta.

4.4. Resultados según perfil de ocupación

La aplicación del perfil de ocupación al potencial de recuperación, supondrá lógicamente una reducción de los valores máximos obtenidos que se muestran en el apartado 4.2.

También cabe recordar que los resultados, se facilitarán tanto por kg_{as} como por persona, según la formulación de las ec. 28 a ec. 31. Como ejemplo, la tabla muestra los valores de potencial de ahorro anual para cada uno de los sistemas de recuperación con IDA-2:

| Población | H_{t_inv} | H_{s_inv} | ΔH_{ts_inv} | H_{t_ver} | H_{s_ver} | ΔH_{ts_ver} | H_t | H_s | ΔH_{ts} |
|---------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|----------------------|-------|-------|-----------------|
| albacete | 4875 | 3591 | 1284 | 181 | 214 | -33 | 5056 | 3805 | 1251 |
| alicante | 2133 | 1785 | 347 | 1472 | 280 | 1192 | 3604 | 2066 | 1539 |
| almeria | 1672 | 1452 | 221 | 1561 | 285 | 1277 | 3234 | 1736 | 1497 |
| avila | 6428 | 4423 | 2005 | 0 | 24 | -24 | 6428 | 4447 | 1981 |
| badajoz | 2999 | 2511 | 488 | 505 | 380 | 125 | 3504 | 2890 | 613 |
| barcelona | 3274 | 2735 | 539 | 939 | 94 | 845 | 4213 | 2830 | 1383 |
| bilbao | 3704 | 3064 | 640 | 274 | 28 | 245 | 3978 | 3093 | 885 |
| burgos | 6191 | 4701 | 1489 | 16 | 14 | 2 | 6206 | 4715 | 1491 |
| caceres | 3233 | 2662 | 571 | 299 | 343 | -44 | 3532 | 3004 | 528 |
| cadiz | 1651 | 1373 | 277 | 1633 | 143 | 1490 | 3284 | 1516 | 1768 |
| castello | 2718 | 2179 | 539 | 1253 | 195 | 1058 | 3971 | 2374 | 1597 |
| ciudadreal | 4183 | 3244 | 939 | 331 | 296 | 35 | 4514 | 3540 | 974 |
| cordoba | 2626 | 2183 | 443 | 754 | 503 | 251 | 3380 | 2686 | 694 |
| cuenca | 5255 | 3837 | 1418 | 19 | 140 | -120 | 5275 | 3977 | 1298 |
| gerona | 4094 | 3302 | 791 | 423 | 124 | 299 | 4517 | 3426 | 1091 |
| granada | 3948 | 3012 | 935 | 226 | 312 | -86 | 4174 | 3324 | 850 |
| guadalajara | 4333 | 3393 | 940 | 228 | 185 | 42 | 4560 | 3578 | 982 |
| huelva | 1865 | 1549 | 316 | 850 | 305 | 544 | 2714 | 1854 | 860 |
| huesca | 4564 | 3523 | 1041 | 156 | 152 | 4 | 4720 | 3675 | 1045 |
| jaen | 3022 | 2462 | 560 | 654 | 425 | 230 | 3676 | 2886 | 790 |
| lacoruna | 3356 | 2857 | 498 | 5 | 1 | 4 | 3360 | 2858 | 503 |
| leon | 5964 | 4331 | 1633 | 23 | 37 | -14 | 5986 | 4368 | 1618 |
| lerida | 4157 | 3228 | 929 | 343 | 225 | 118 | 4499 | 3453 | 1047 |
| logrono | 4638 | 3528 | 1110 | 141 | 120 | 21 | 4778 | 3647 | 1131 |
| lugo | 5347 | 4465 | 882 | 4 | 2 | 3 | 5351 | 4466 | 885 |
| madrid | 4345 | 3151 | 1194 | 38 | 192 | -154 | 4383 | 3343 | 1040 |
| malaga | 1863 | 1600 | 264 | 1063 | 243 | 820 | 2926 | 1843 | 1084 |
| murcia | 2431 | 2080 | 352 | 1566 | 169 | 1398 | 3998 | 2249 | 1749 |
| oreense | 3712 | 3155 | 557 | 209 | 136 | 73 | 3921 | 3290 | 630 |
| oviedo | 4341 | 3614 | 727 | 43 | 2 | 42 | 4385 | 3616 | 769 |
| palencia | 5161 | 4018 | 1143 | 51 | 42 | 9 | 5212 | 4060 | 1152 |
| palmamallorca | 2161 | 1865 | 297 | 1771 | 205 | 1566 | 3932 | 2070 | 1862 |
| pamplona | 5002 | 3872 | 1130 | 37 | 39 | -2 | 5039 | 3911 | 1128 |
| pontevedra | 2984 | 2579 | 404 | 95 | 40 | 55 | 3079 | 2620 | 460 |
| salamanca | 5288 | 4029 | 1260 | 41 | 66 | -24 | 5330 | 4094 | 1236 |
| sansebastian | 4006 | 3394 | 613 | 233 | 3 | 231 | 4240 | 3396 | 843 |
| santander | 3487 | 2926 | 561 | 191 | 3 | 188 | 3678 | 2929 | 749 |
| segovia | 5444 | 3976 | 1469 | 38 | 79 | -41 | 5482 | 4054 | 1428 |
| sevilla | 2106 | 1816 | 290 | 877 | 514 | 363 | 2982 | 2330 | 652 |
| soria | 6144 | 4431 | 1713 | 35 | 43 | -8 | 6180 | 4475 | 1705 |
| tarragona | 2734 | 2166 | 568 | 1079 | 280 | 799 | 3813 | 2446 | 1367 |
| teruel | 5875 | 4140 | 1735 | 76 | 86 | -10 | 5952 | 4226 | 1726 |
| toledo | 3809 | 2924 | 884 | 456 | 366 | 91 | 4265 | 3290 | 975 |
| valencia | 2806 | 2208 | 598 | 1226 | 176 | 1050 | 4032 | 2384 | 1648 |
| valladolid | 5084 | 3899 | 1185 | 32 | 105 | -73 | 5116 | 4003 | 1112 |
| vitória | 5389 | 4266 | 1123 | 6 | 4 | 2 | 5395 | 4270 | 1125 |
| zamora | 5020 | 3765 | 1255 | 30 | 103 | -74 | 5050 | 3869 | 1181 |
| zaragoza | 4159 | 3194 | 965 | 306 | 213 | 94 | 4465 | 3407 | 1059 |

Tabla 18. Potencial anual de recuperación en MJ/persona (IDA-2)

4.4.1. Centros docentes

Aplicando el factor de ocupación en centros docentes de la Tabla 12, se obtienen los resultados que muestra la siguiente tabla:

| Población | H_{t_inv} | H_{s_inv} | ΔH_{ts_inv} | H_{t_ver} | H_{s_ver} | ΔH_{ts_ver} | H_t | H_s | ΔH_{ts} |
|---------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|----------------------|-------|-------|-----------------|
| albacete | 986 | 884 | 102 | 50 | 61 | -11 | 1037 | 945 | 91 |
| alicante | 387 | 428 | -41 | 377 | 81 | 295 | 763 | 509 | 254 |
| almeria | 302 | 356 | -54 | 398 | 78 | 320 | 700 | 434 | 266 |
| avila | 1350 | 1094 | 256 | 0 | 7 | -7 | 1350 | 1101 | 248 |
| badajoz | 574 | 621 | -47 | 146 | 112 | 34 | 720 | 733 | -13 |
| barcelona | 636 | 676 | -41 | 244 | 29 | 215 | 880 | 705 | 175 |
| bilbao | 742 | 754 | -12 | 68 | 8 | 60 | 810 | 762 | 48 |
| burgos | 1273 | 1161 | 112 | 6 | 4 | 1 | 1279 | 1165 | 114 |
| caceres | 628 | 656 | -28 | 80 | 97 | -17 | 707 | 752 | -45 |
| cadiz | 296 | 331 | -35 | 427 | 40 | 387 | 723 | 372 | 351 |
| castello | 512 | 534 | -22 | 322 | 58 | 264 | 834 | 592 | 242 |
| ciudadreal | 816 | 798 | 18 | 95 | 86 | 9 | 911 | 884 | 26 |
| cordoba | 481 | 526 | -44 | 197 | 144 | 53 | 678 | 670 | 9 |
| cuenca | 1072 | 949 | 123 | 7 | 41 | -35 | 1078 | 990 | 88 |
| gerona | 803 | 812 | -10 | 113 | 37 | 76 | 916 | 849 | 66 |
| granada | 769 | 734 | 34 | 64 | 92 | -27 | 833 | 826 | 7 |
| guadalajara | 876 | 848 | 28 | 70 | 56 | 14 | 946 | 904 | 42 |
| huelva | 339 | 377 | -38 | 215 | 91 | 124 | 555 | 468 | 86 |
| huesca | 900 | 870 | 30 | 49 | 47 | 2 | 949 | 917 | 32 |
| jaen | 572 | 598 | -25 | 169 | 120 | 49 | 741 | 718 | 23 |
| lacoruna | 691 | 703 | -12 | 2 | 0 | 2 | 693 | 704 | -10 |
| leon | 1222 | 1071 | 152 | 7 | 12 | -5 | 1229 | 1082 | 147 |
| lerida | 820 | 800 | 20 | 97 | 67 | 30 | 917 | 867 | 50 |
| logrono | 930 | 869 | 62 | 40 | 36 | 4 | 970 | 904 | 66 |
| lugo | 1101 | 1103 | -2 | 1 | 0 | 0 | 1102 | 1103 | -1 |
| madrid | 874 | 778 | 95 | 15 | 58 | -43 | 889 | 837 | 52 |
| malaga | 345 | 387 | -42 | 277 | 68 | 209 | 623 | 455 | 167 |
| murcia | 460 | 506 | -46 | 404 | 49 | 355 | 864 | 554 | 309 |
| orense | 747 | 784 | -36 | 59 | 42 | 17 | 806 | 826 | -20 |
| oviedo | 883 | 887 | -3 | 16 | 1 | 15 | 899 | 888 | 12 |
| palencia | 1049 | 994 | 55 | 16 | 13 | 3 | 1065 | 1007 | 58 |
| palmamallorca | 412 | 460 | -49 | 457 | 58 | 399 | 869 | 518 | 351 |
| pamplona | 998 | 952 | 46 | 12 | 12 | 0 | 1010 | 965 | 45 |
| pontevedra | 596 | 633 | -37 | 28 | 13 | 15 | 624 | 646 | -22 |
| salamanca | 1068 | 992 | 76 | 13 | 19 | -6 | 1081 | 1011 | 69 |
| sansebastian | 822 | 843 | -21 | 63 | 1 | 62 | 885 | 844 | 41 |
| santander | 716 | 728 | -12 | 47 | 1 | 46 | 764 | 730 | 34 |
| segovia | 1126 | 988 | 138 | 14 | 24 | -11 | 1139 | 1012 | 128 |
| sevilla | 377 | 441 | -64 | 212 | 145 | 68 | 589 | 585 | 4 |
| soria | 1287 | 1106 | 181 | 12 | 14 | -2 | 1298 | 1119 | 179 |
| tarragona | 513 | 529 | -16 | 274 | 80 | 194 | 787 | 609 | 179 |
| teruel | 1219 | 1019 | 199 | 25 | 27 | -2 | 1244 | 1047 | 197 |
| toledo | 720 | 715 | 6 | 134 | 107 | 27 | 854 | 822 | 32 |
| valencia | 533 | 537 | -4 | 316 | 53 | 263 | 849 | 590 | 259 |
| valladolid | 1038 | 974 | 64 | 11 | 34 | -22 | 1050 | 1008 | 42 |
| vitoria | 1096 | 1058 | 38 | 2 | 2 | 0 | 1098 | 1060 | 38 |
| zamora | 1019 | 936 | 82 | 10 | 31 | -21 | 1029 | 967 | 62 |
| zaragoza | 824 | 785 | 39 | 83 | 63 | 21 | 908 | 848 | 60 |

Tabla 19. Potencial de ahorro anual, en MJ/persona, para un centro docente (IDA-2)

Y representado los valores de la diferencia de ahorro ΔH para cada uno de los sistemas de recuperación sobre el mapa peninsular, se obtiene:

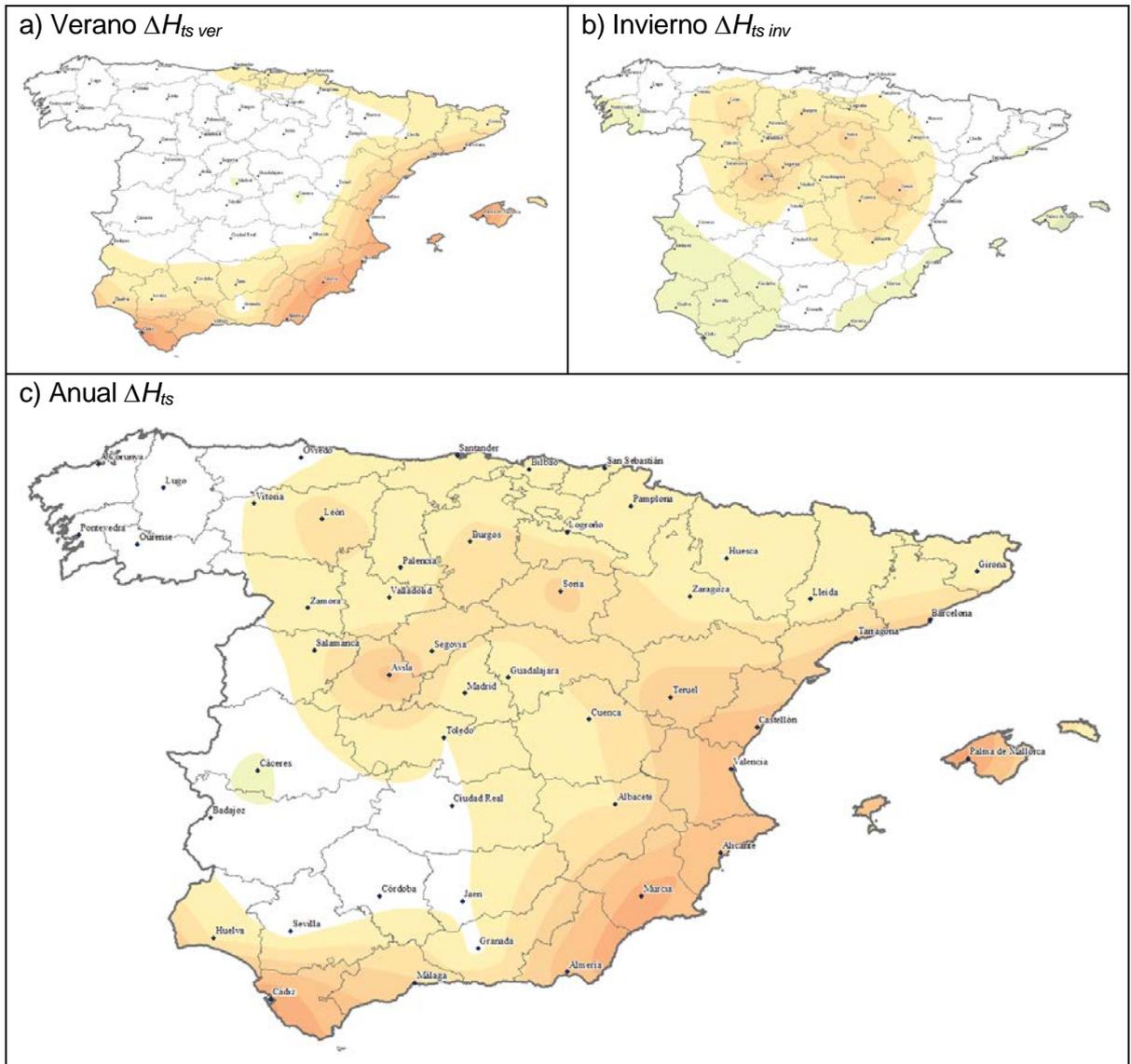


Fig. 45 Potencial de recuperación por persona en centros docentes: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

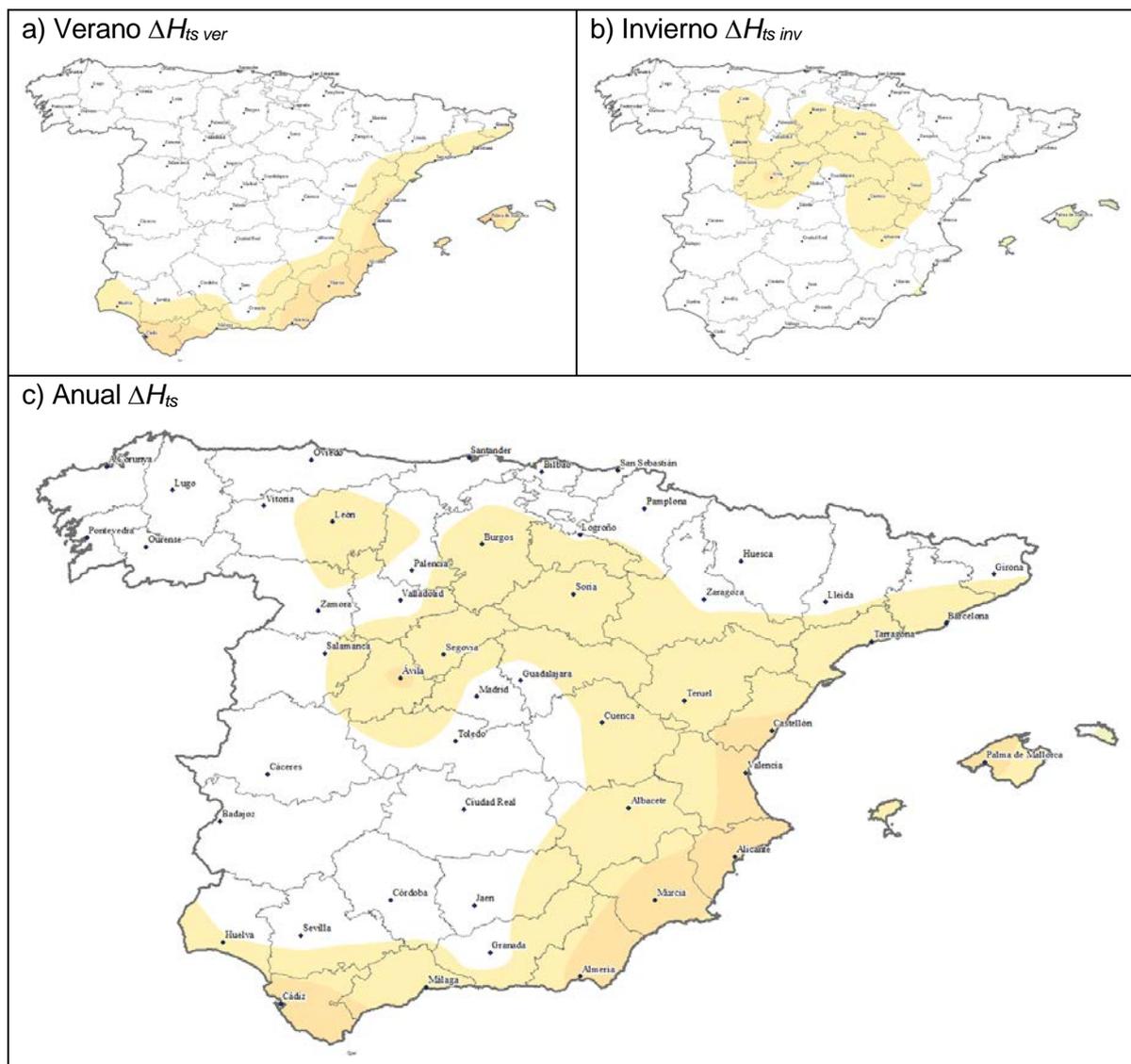


Fig. 46 Potencial de recuperación por kg_{as} en centros docentes: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

De este último mapa podemos decir que las zonas que presentan los mayores valores de recuperación son similares al mapa c) de la Fig. 42 que mostraba la diferencia entre el potencial máximo de recuperación entálpica y sensible ΔH_{ts} , y lo mismo sucede con las zonas de valores mínimos, por lo que no supone una apreciable diferencia cualitativa.

Sin embargo, se observa que las zonas con valores mínimos de ΔH_{ts} , presentan valores de diferencial de recuperación nulo, incluso alguna zona con valores negativos, lo cual resulta especialmente apreciable en los mapas por persona en verano Fig. 45 a) e invierno Fig. 45 b).

Lógicamente en estas zonas, para este tipo de edificio y perfil de ocupación, estaría totalmente desaconsejado el uso de un recuperador entálpico y convendría decantarse por uno de tipo sensible.

También es de destacar que los valores máximos son realmente bajos y parece difícil que resulte rentable decantarse por un recuperador entálpico en este caso, siendo el análisis económico será crucial para la toma de decisiones.

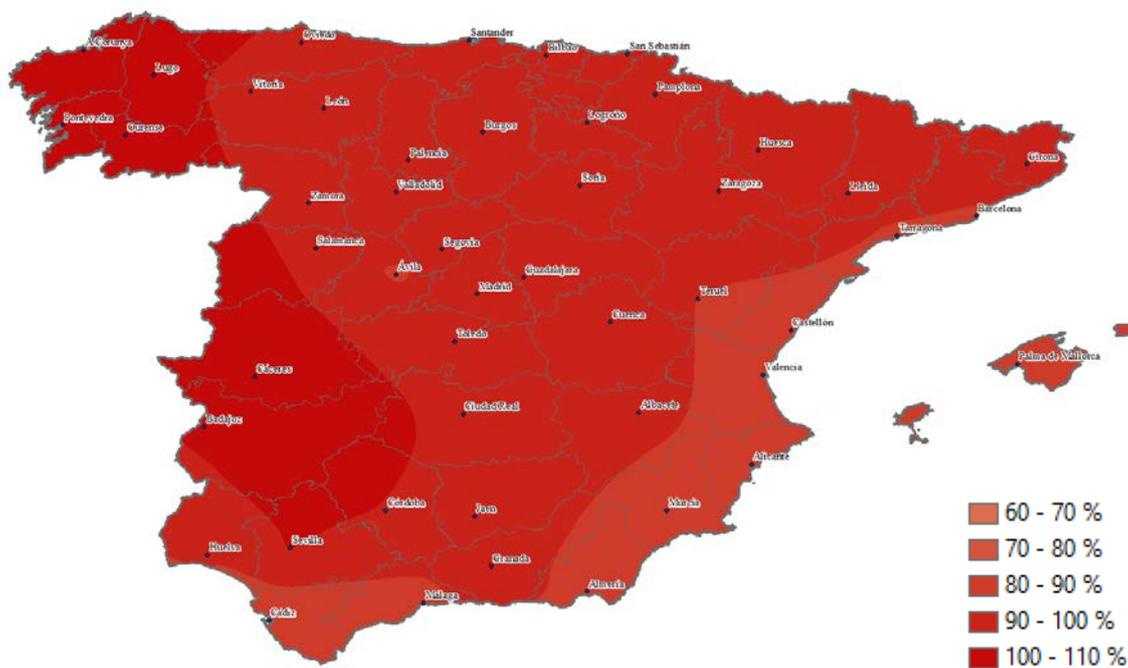


Fig. 47 Pérdida % potencial de recuperación anual H_i : centro docente vs máximo.

A la vista de los resultados se puede extraer que, para los centros docentes, con el perfil de ocupación propuesto, hay ciertas poblaciones donde anteriormente, con un funcionamiento del centro las 24 horas del día 7 días a la semana, los ERV resultaban obtener mayores valores de ahorro, ahora son los HRV que resultan obtener mayores beneficios. Véase la zona de Galicia, Badajoz y Cáceres. Para el resto de poblaciones, todo y que el potencial de ahorro disminuye por tener menos horas de recuperación, los ERV siguen obteniendo mayores valores de ahorro que los HRV.

Básicamente se debe a que, si se parte de la base que el período donde se produce mayor recuperación de calor es en las horas nocturnas de la temporada de invierno, éstas son las horas en las que el sistema no está en funcionamiento cuando se aplica un perfil de ocupación.

4.4.2. Oficinas

Aplicando el factor de ocupación en oficinas de la Tabla 12, se obtienen los resultados que muestra la siguiente tabla:

| Población | H_{t_inv} | H_{s_inv} | ΔH_{ts_inv} | H_{t_ver} | H_{s_ver} | ΔH_{ts_ver} | H_t | H_s | ΔH_{ts} |
|---------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|----------------------|-------|-------|-----------------|
| albacete | 1027 | 905 | 122 | 67 | 80 | -13 | 1094 | 985 | 109 |
| alicante | 387 | 425 | -38 | 427 | 105 | 322 | 813 | 530 | 284 |
| almeria | 304 | 359 | -54 | 448 | 99 | 349 | 752 | 458 | 295 |
| avila | 1430 | 1143 | 287 | 0 | 10 | -10 | 1430 | 1153 | 277 |
| badajoz | 581 | 627 | -46 | 189 | 144 | 45 | 770 | 771 | -1 |
| barcelona | 654 | 696 | -42 | 271 | 38 | 233 | 925 | 734 | 191 |
| bilbao | 760 | 775 | -15 | 80 | 11 | 69 | 840 | 786 | 54 |
| burgos | 1330 | 1210 | 120 | 8 | 6 | 2 | 1337 | 1215 | 122 |
| caceres | 647 | 674 | -27 | 107 | 123 | -17 | 754 | 797 | -43 |
| cadiz | 303 | 343 | -40 | 475 | 52 | 423 | 777 | 395 | 383 |
| castello | 521 | 540 | -19 | 363 | 75 | 288 | 884 | 615 | 269 |
| ciudadreal | 839 | 818 | 21 | 125 | 111 | 14 | 965 | 929 | 35 |
| cordoba | 487 | 529 | -42 | 248 | 184 | 64 | 734 | 713 | 22 |
| cuenca | 1117 | 979 | 138 | 10 | 55 | -45 | 1127 | 1034 | 93 |
| gerona | 820 | 827 | -7 | 137 | 48 | 89 | 957 | 876 | 82 |
| granada | 789 | 740 | 49 | 86 | 119 | -33 | 875 | 858 | 17 |
| guadalajara | 909 | 875 | 35 | 93 | 73 | 19 | 1002 | 948 | 54 |
| huelva | 339 | 377 | -38 | 255 | 116 | 138 | 594 | 494 | 100 |
| huesca | 943 | 907 | 37 | 65 | 61 | 4 | 1008 | 968 | 41 |
| jaen | 586 | 613 | -27 | 207 | 153 | 54 | 793 | 766 | 27 |
| lacoruna | 722 | 738 | -16 | 3 | 0 | 2 | 724 | 738 | -14 |
| leon | 1281 | 1112 | 169 | 9 | 15 | -6 | 1290 | 1127 | 163 |
| lerida | 856 | 827 | 29 | 121 | 86 | 34 | 976 | 913 | 63 |
| logrono | 975 | 903 | 73 | 53 | 47 | 5 | 1028 | 950 | 78 |
| lugo | 1135 | 1142 | -7 | 1 | 0 | 1 | 1136 | 1143 | -7 |
| madrid | 919 | 808 | 111 | 21 | 75 | -55 | 940 | 884 | 56 |
| malaga | 348 | 391 | -43 | 315 | 88 | 227 | 663 | 479 | 184 |
| murcia | 464 | 508 | -44 | 450 | 63 | 387 | 913 | 570 | 343 |
| orense | 761 | 798 | -37 | 76 | 55 | 21 | 837 | 853 | -16 |
| oviedo | 910 | 918 | -8 | 18 | 1 | 17 | 928 | 919 | 9 |
| palencia | 1100 | 1039 | 61 | 22 | 18 | 4 | 1122 | 1057 | 65 |
| palmamallorca | 419 | 471 | -53 | 510 | 73 | 436 | 928 | 545 | 384 |
| pamplona | 1042 | 989 | 53 | 17 | 16 | 0 | 1059 | 1006 | 53 |
| pontevedra | 615 | 653 | -38 | 35 | 17 | 18 | 650 | 671 | -21 |
| salamanca | 1112 | 1027 | 85 | 18 | 26 | -8 | 1129 | 1053 | 77 |
| sansebastian | 862 | 886 | -24 | 70 | 2 | 68 | 932 | 888 | 44 |
| santander | 748 | 764 | -16 | 54 | 2 | 53 | 803 | 766 | 37 |
| segovia | 1189 | 1032 | 157 | 19 | 32 | -13 | 1208 | 1065 | 143 |
| sevilla | 379 | 442 | -63 | 260 | 185 | 74 | 638 | 628 | 11 |
| soria | 1346 | 1145 | 201 | 15 | 18 | -2 | 1361 | 1162 | 199 |
| tarragona | 525 | 536 | -11 | 314 | 103 | 211 | 839 | 639 | 200 |
| teruel | 1273 | 1048 | 225 | 34 | 36 | -2 | 1307 | 1084 | 224 |
| toledo | 745 | 731 | 14 | 173 | 137 | 36 | 918 | 868 | 50 |
| valencia | 541 | 539 | 2 | 351 | 68 | 284 | 893 | 607 | 286 |
| valladolid | 1077 | 1005 | 73 | 16 | 44 | -28 | 1093 | 1049 | 44 |
| vitoria | 1141 | 1103 | 38 | 3 | 3 | 0 | 1144 | 1106 | 38 |
| zamora | 1066 | 973 | 93 | 14 | 41 | -27 | 1080 | 1013 | 66 |
| zaragoza | 860 | 811 | 49 | 107 | 81 | 26 | 967 | 892 | 75 |

Tabla 20. Potencial de ahorro, en MJ/año/persona, para unas oficinas (IDA-2)

Y representado los valores de la diferencia de ahorro para cada uno de los sistemas de recuperación sobre el mapa peninsular, se obtiene:

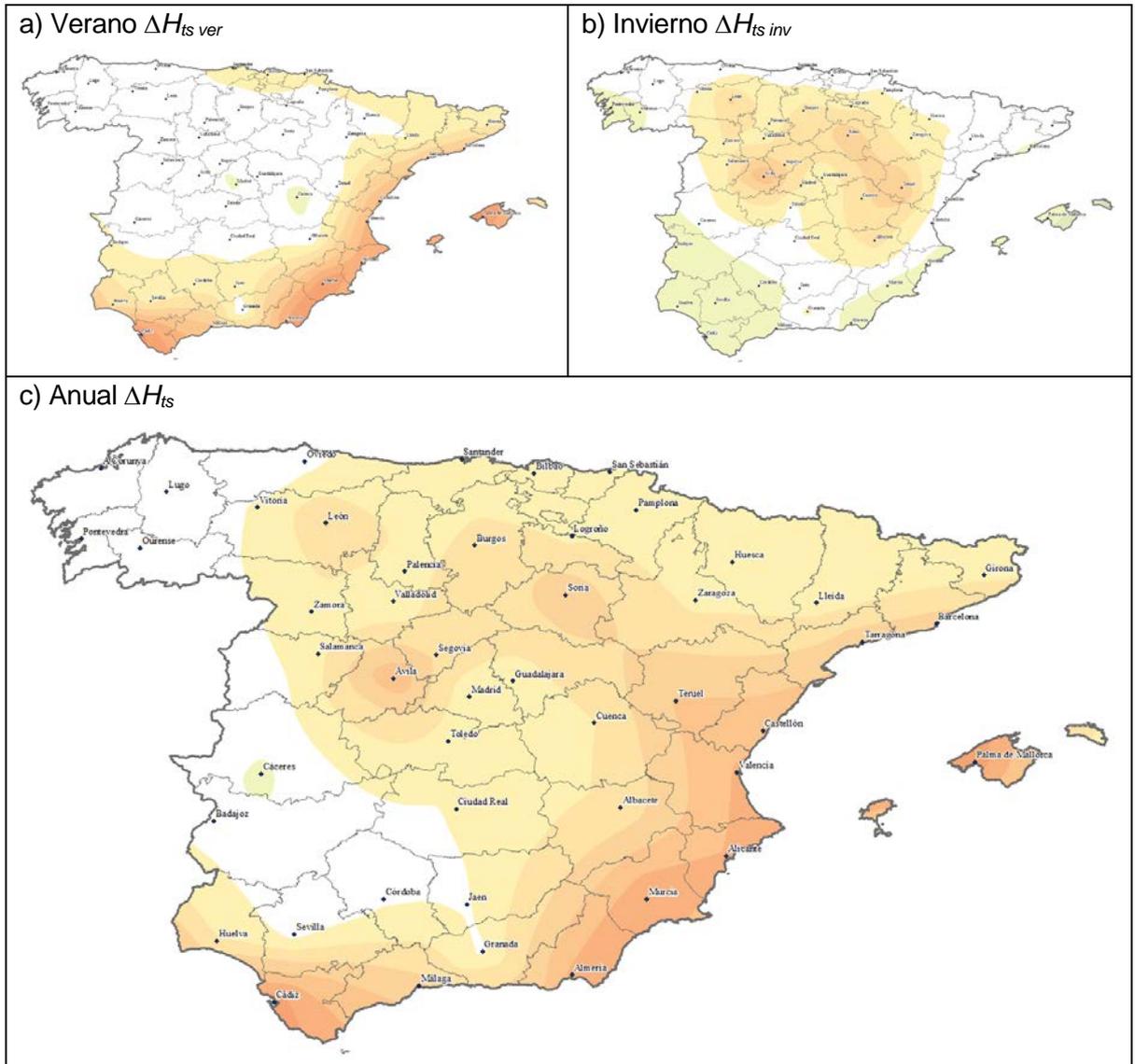


Fig. 48 Potencial de recuperación por persona en oficinas: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

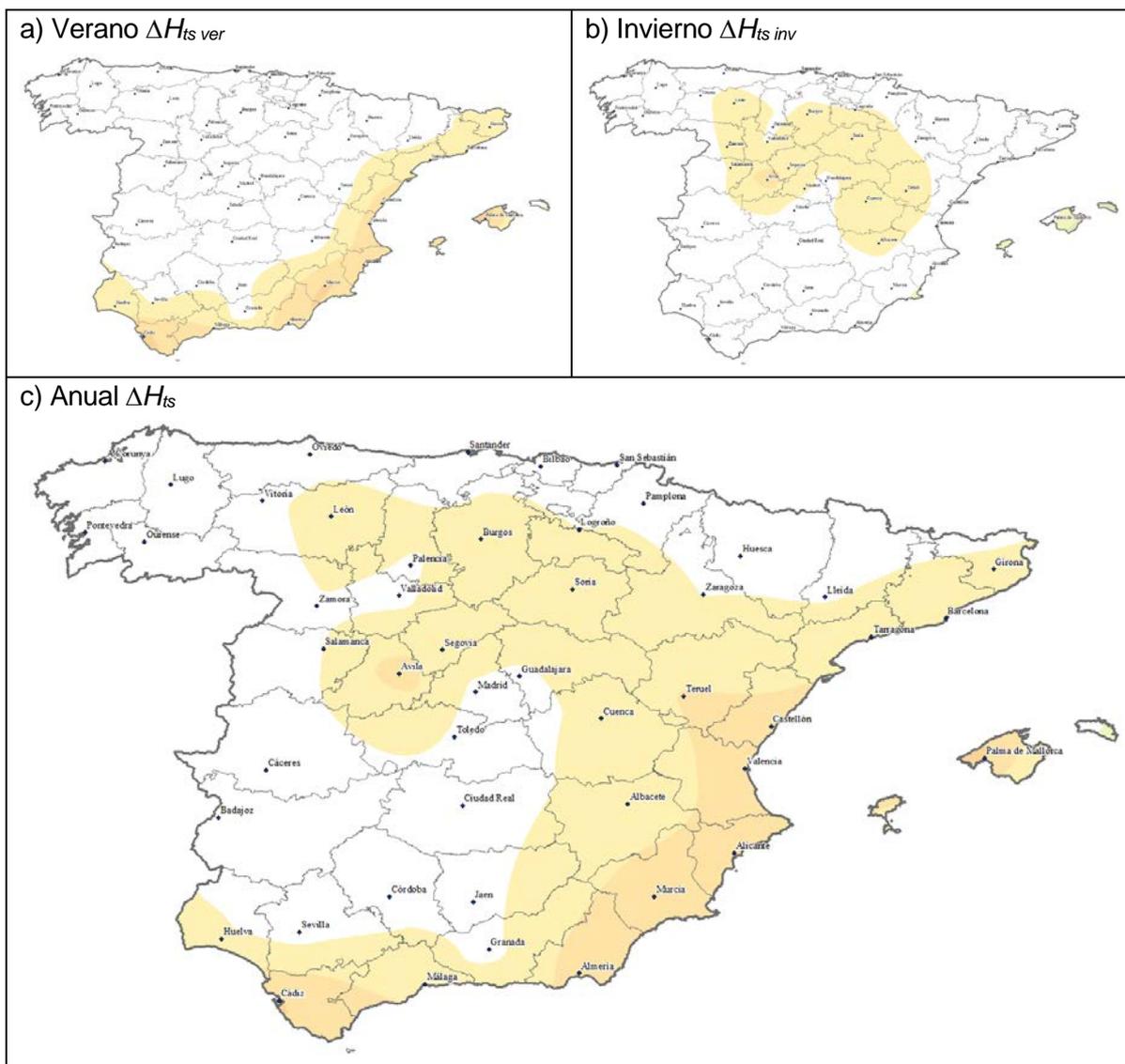


Fig. 49 Potencial de recuperación por kgas en oficinas: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

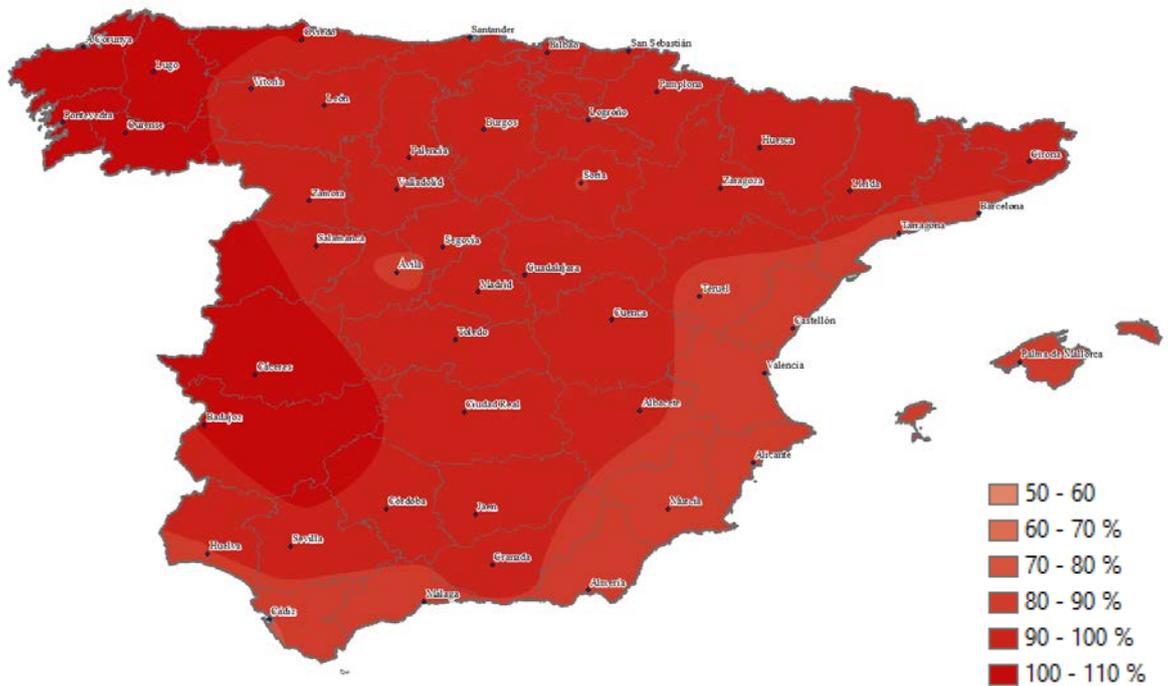


Fig. 50 Pérdida % potencial de recuperación anual H_t oficinas: vs máximo.

Para los edificios de oficinas, los resultados son similares que para los centros docentes, con la diferencia que, para esta tipología de edificios, al estar el sistema de ventilación más horas en funcionamiento, o bien al tener valores de ocupación superiores y en consecuencia, mayores caudales de ventilación, se puede llegar a valores de recuperación superiores.

4.4.3. Comercial

Aplicando el factor de ocupación en comercios de la Tabla 12, se obtienen los resultados que muestra la siguiente tabla:

| Población | H_{t_inv} | H_{s_inv} | ΔH_{ts_inv} | H_{t_ver} | H_{s_ver} | ΔH_{ts_ver} | H_t | H_s | ΔH_{ts} |
|---------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|----------------------|-------|-------|-----------------|
| albacete | 633 | 546 | 88 | 53 | 64 | -10 | 687 | 609 | 77 |
| alicante | 225 | 246 | -21 | 295 | 82 | 213 | 520 | 328 | 192 |
| almeria | 179 | 212 | -33 | 311 | 79 | 231 | 489 | 291 | 198 |
| avila | 910 | 713 | 198 | 0 | 7 | -7 | 910 | 720 | 191 |
| badajoz | 346 | 371 | -26 | 142 | 113 | 29 | 488 | 484 | 4 |
| barcelona | 396 | 423 | -27 | 183 | 29 | 154 | 579 | 452 | 126 |
| bilbao | 463 | 471 | -8 | 58 | 9 | 49 | 521 | 479 | 42 |
| burgos | 827 | 749 | 78 | 5 | 4 | 0 | 832 | 753 | 79 |
| caceres | 395 | 411 | -16 | 82 | 97 | -16 | 476 | 508 | -32 |
| cadiz | 183 | 212 | -30 | 321 | 41 | 280 | 504 | 253 | 251 |
| castello | 312 | 320 | -9 | 247 | 57 | 190 | 559 | 378 | 181 |
| ciudadreal | 514 | 498 | 16 | 94 | 87 | 7 | 608 | 585 | 23 |
| cordoba | 288 | 311 | -23 | 190 | 145 | 44 | 478 | 456 | 22 |
| cuenca | 695 | 599 | 95 | 7 | 43 | -36 | 702 | 642 | 60 |
| gerona | 493 | 496 | -3 | 102 | 37 | 66 | 595 | 533 | 62 |
| granada | 475 | 434 | 40 | 68 | 94 | -26 | 543 | 528 | 15 |
| guadalajara | 558 | 535 | 23 | 68 | 56 | 13 | 627 | 590 | 36 |
| huelva | 197 | 223 | -27 | 184 | 89 | 95 | 380 | 312 | 68 |
| huesca | 593 | 564 | 29 | 47 | 47 | 0 | 640 | 611 | 29 |
| jaen | 360 | 375 | -15 | 158 | 121 | 37 | 518 | 495 | 22 |
| lacoruna | 452 | 464 | -12 | 2 | 0 | 1 | 453 | 464 | -11 |
| leon | 805 | 687 | 118 | 6 | 11 | -5 | 811 | 698 | 113 |
| lerida | 528 | 505 | 23 | 90 | 67 | 23 | 618 | 571 | 47 |
| logrono | 610 | 557 | 52 | 41 | 37 | 4 | 650 | 594 | 56 |
| lugo | 691 | 701 | -10 | 1 | 0 | 0 | 691 | 701 | -10 |
| madrid | 581 | 503 | 79 | 12 | 58 | -46 | 593 | 560 | 33 |
| malaga | 207 | 232 | -26 | 220 | 69 | 151 | 427 | 302 | 125 |
| murcia | 272 | 297 | -25 | 304 | 50 | 255 | 576 | 346 | 230 |
| oreense | 453 | 477 | -25 | 60 | 42 | 18 | 513 | 519 | -7 |
| oviedo | 555 | 567 | -12 | 11 | 1 | 10 | 566 | 568 | -2 |
| palencia | 690 | 650 | 40 | 15 | 12 | 3 | 705 | 662 | 43 |
| palmamallorca | 250 | 286 | -36 | 346 | 57 | 288 | 596 | 344 | 253 |
| pamplona | 649 | 612 | 38 | 12 | 12 | 0 | 662 | 624 | 38 |
| pontevedra | 372 | 399 | -27 | 26 | 12 | 14 | 398 | 411 | -13 |
| salamanca | 690 | 632 | 58 | 13 | 20 | -7 | 703 | 652 | 51 |
| sansebastian | 536 | 557 | -21 | 45 | 1 | 44 | 581 | 558 | 23 |
| santander | 464 | 478 | -14 | 41 | 1 | 40 | 504 | 479 | 25 |
| segovia | 752 | 644 | 108 | 13 | 25 | -11 | 766 | 669 | 97 |
| sevilla | 223 | 258 | -35 | 194 | 146 | 47 | 417 | 405 | 12 |
| soria | 838 | 703 | 136 | 10 | 13 | -3 | 849 | 716 | 133 |
| tarragona | 318 | 320 | -2 | 222 | 82 | 140 | 540 | 401 | 138 |
| teruel | 792 | 636 | 156 | 24 | 27 | -2 | 816 | 663 | 153 |
| toledo | 456 | 442 | 15 | 131 | 106 | 25 | 587 | 548 | 39 |
| valencia | 324 | 316 | 8 | 236 | 51 | 185 | 561 | 368 | 193 |
| valladolid | 662 | 612 | 50 | 11 | 33 | -22 | 673 | 645 | 29 |
| vitoria | 712 | 687 | 26 | 2 | 2 | 0 | 714 | 688 | 26 |
| zamora | 665 | 600 | 65 | 10 | 32 | -23 | 674 | 633 | 42 |
| zaragoza | 535 | 498 | 37 | 82 | 63 | 19 | 617 | 561 | 56 |

Tabla 21. Potencial de ahorro, en MJ/año/persona, para comercios (IDA-3)

Y representado los valores de la diferencia de ahorro para cada uno de los sistemas de recuperación sobre el mapa peninsular, se obtiene:

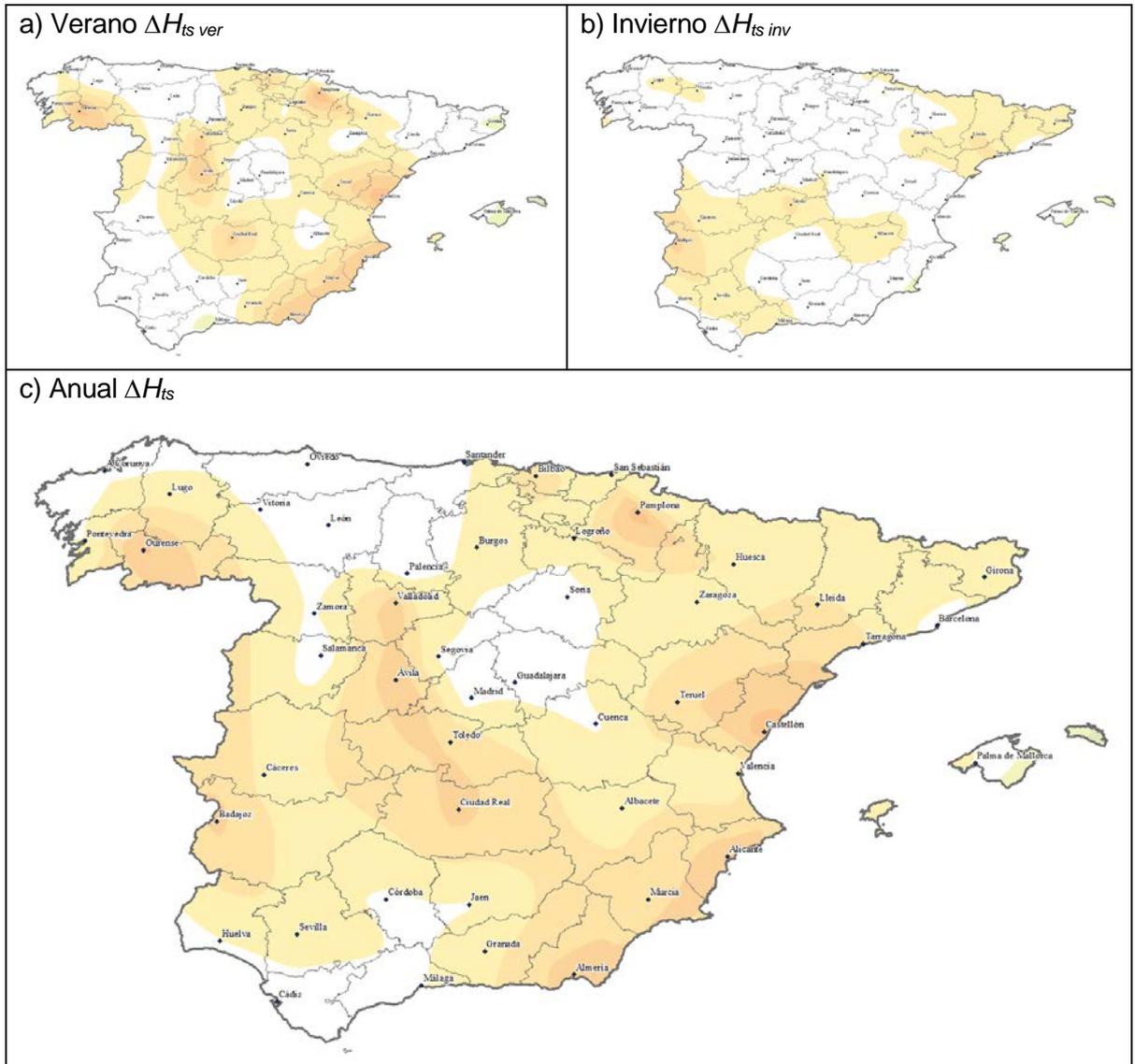


Fig. 51 Potencial de recuperación por persona en local comercial: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

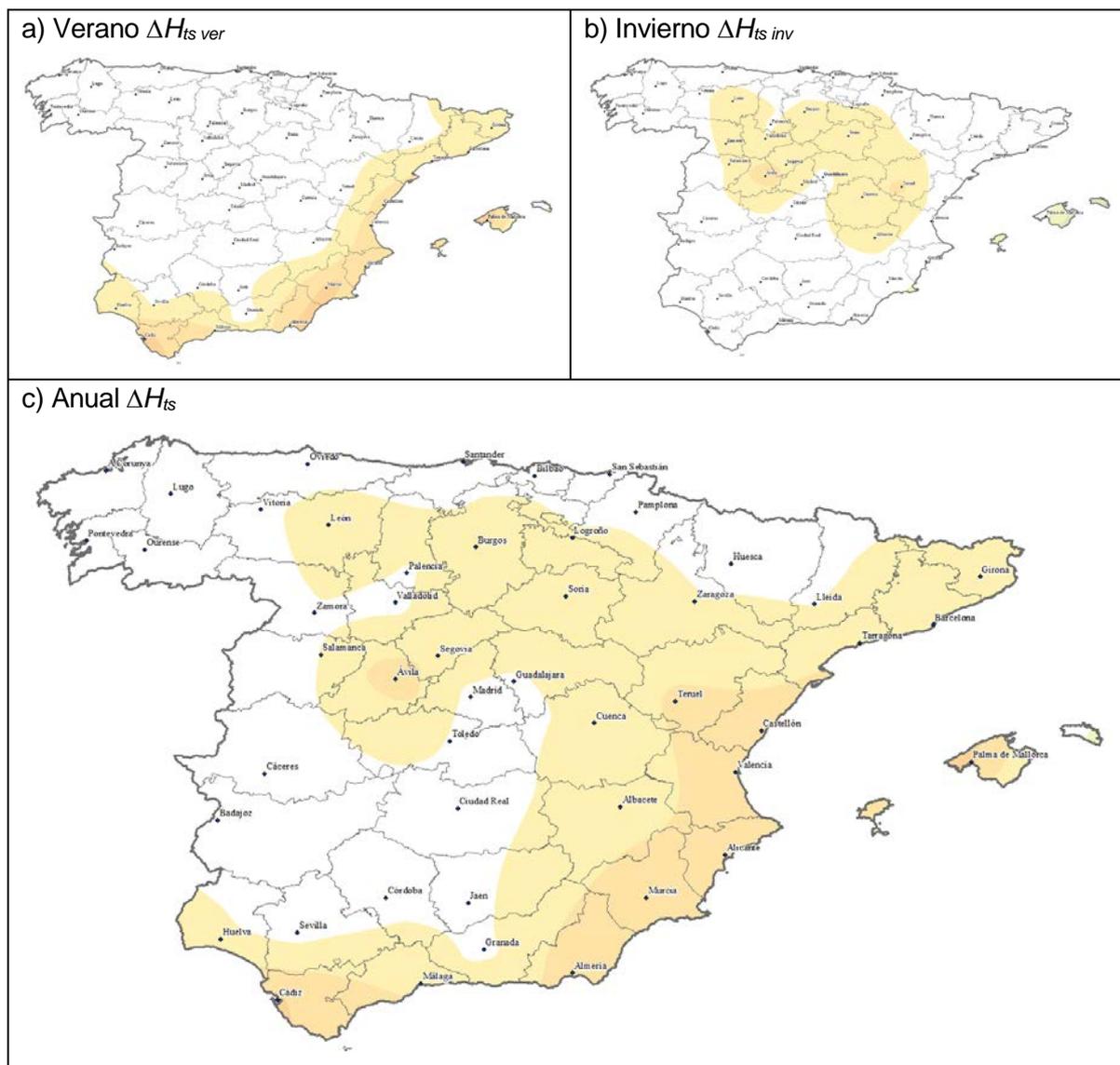


Fig. 52 Potencial de recuperación por kg_{as} en local comercial: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

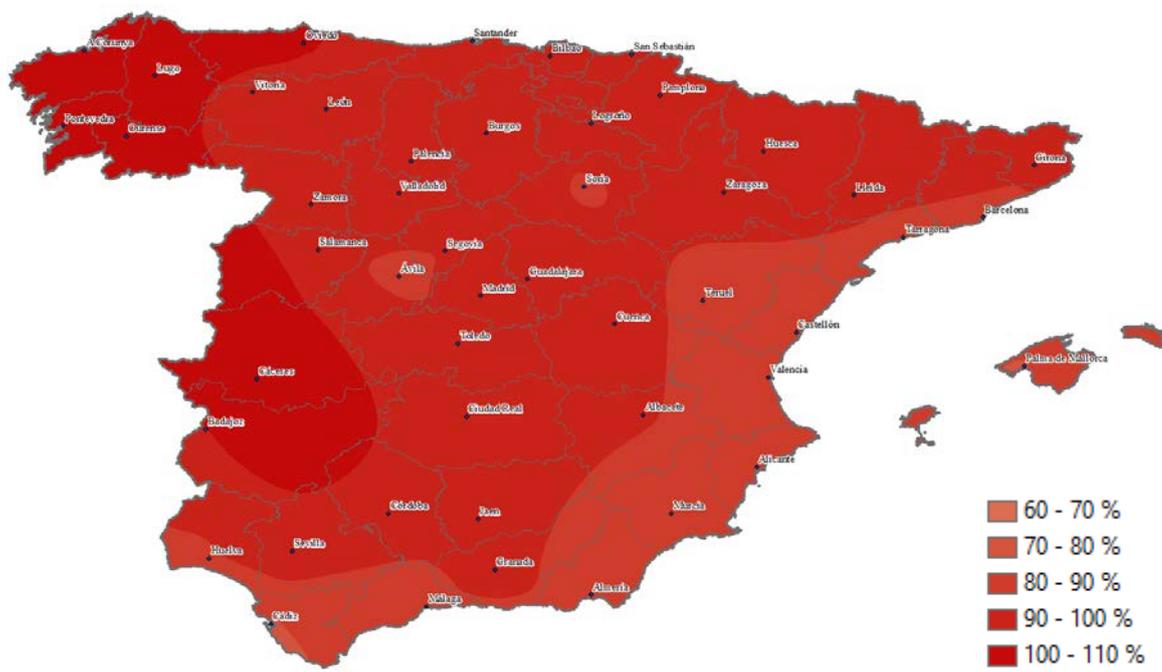


Fig. 53 Pérdida % potencial de recuperación anual H_r : comercio vs máximo.

Al igual que con el perfil de oficinas o docente, para los edificios de tipo comercial también se produce un brusco descenso del ahorro.

Los motivos pueden ser diversos. El primero de ellos sería por haber reducido el caudal de ventilación por persona, ya que para esta tipología de edificios se considera una calidad de aire IDA-3 (8 l/s/p), en lugar del IDA-2 (12 l/s/p) como ocurría en los casos anteriores.

El segundo de los motivos es debido a la diferencia de horarios de funcionamiento del sistema. En este caso, las horas de funcionamiento del sistema, desplazadas más entrado el día, hacen que las variaciones de humedad y temperatura sean más favorables para unas poblaciones que para otras.

4.4.4. Hoteles

Aplicando el factor de ocupación en hoteles de la Tabla 12, se obtienen los resultados que muestra la siguiente tabla:

| Población | H_{t_inv} | H_{s_inv} | ΔH_{ts_inv} | H_{t_ver} | H_{s_ver} | ΔH_{ts_ver} | H_t | H_s | ΔH_{ts} |
|---------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|----------------------|-------|-------|-----------------|
| albacete | 2397 | 2157 | 240 | 86 | 100 | -14 | 2483 | 2257 | 226 |
| alicante | 1011 | 1097 | -86 | 822 | 133 | 689 | 1833 | 1230 | 603 |
| almeria | 767 | 887 | -119 | 872 | 138 | 734 | 1640 | 1024 | 615 |
| avila | 3201 | 2619 | 582 | 0 | 11 | -11 | 3201 | 2630 | 571 |
| badajoz | 1465 | 1524 | -60 | 249 | 179 | 70 | 1714 | 1703 | 11 |
| barcelona | 1570 | 1642 | -72 | 528 | 44 | 484 | 2098 | 1686 | 412 |
| bilbao | 1856 | 1837 | 19 | 150 | 13 | 137 | 2006 | 1850 | 156 |
| burgos | 3084 | 2789 | 295 | 7 | 6 | 1 | 3091 | 2795 | 296 |
| caceres | 1549 | 1597 | -48 | 145 | 163 | -18 | 1694 | 1761 | -66 |
| cadiz | 742 | 822 | -80 | 913 | 68 | 845 | 1654 | 890 | 764 |
| castello | 1294 | 1325 | -32 | 702 | 92 | 610 | 1996 | 1417 | 579 |
| ciudadreal | 2009 | 1948 | 61 | 162 | 139 | 24 | 2172 | 2087 | 85 |
| cordoba | 1272 | 1337 | -65 | 393 | 240 | 153 | 1665 | 1576 | 88 |
| cuenca | 2593 | 2292 | 301 | 9 | 64 | -55 | 2603 | 2356 | 246 |
| gerona | 1991 | 1989 | 2 | 220 | 57 | 162 | 2210 | 2046 | 164 |
| granada | 1922 | 1835 | 87 | 109 | 146 | -36 | 2031 | 1981 | 51 |
| guadalajara | 2087 | 2024 | 63 | 105 | 86 | 19 | 2193 | 2110 | 83 |
| huelva | 879 | 948 | -69 | 467 | 146 | 321 | 1345 | 1094 | 251 |
| huesca | 2172 | 2093 | 80 | 77 | 71 | 6 | 2249 | 2163 | 86 |
| jaen | 1455 | 1479 | -24 | 348 | 205 | 143 | 1804 | 1685 | 119 |
| lacoruna | 1697 | 1692 | 5 | 2 | 0 | 2 | 1699 | 1692 | 7 |
| leon | 2951 | 2575 | 376 | 10 | 17 | -7 | 2962 | 2592 | 370 |
| lerida | 1944 | 1929 | 15 | 175 | 106 | 69 | 2119 | 2035 | 84 |
| logrono | 2232 | 2098 | 133 | 68 | 55 | 13 | 2300 | 2154 | 146 |
| lugo | 2727 | 2663 | 64 | 2 | 1 | 1 | 2729 | 2664 | 65 |
| madrid | 2087 | 1871 | 216 | 19 | 90 | -71 | 2106 | 1962 | 144 |
| malaga | 873 | 976 | -103 | 587 | 116 | 471 | 1460 | 1092 | 368 |
| murcia | 1151 | 1271 | -120 | 880 | 81 | 799 | 2031 | 1352 | 679 |
| orense | 1824 | 1900 | -76 | 100 | 63 | 37 | 1924 | 1963 | -39 |
| oviedo | 2194 | 2152 | 41 | 24 | 1 | 23 | 2218 | 2153 | 64 |
| palencia | 2520 | 2376 | 144 | 24 | 19 | 5 | 2544 | 2395 | 149 |
| palmamallorca | 1036 | 1120 | -84 | 995 | 100 | 895 | 2032 | 1220 | 811 |
| pamplona | 2420 | 2303 | 118 | 17 | 18 | -1 | 2437 | 2320 | 117 |
| pontevedra | 1478 | 1546 | -68 | 46 | 18 | 28 | 1524 | 1564 | -40 |
| salamanca | 2614 | 2401 | 213 | 19 | 30 | -11 | 2633 | 2431 | 202 |
| sansebastian | 1977 | 2002 | -25 | 132 | 1 | 131 | 2109 | 2003 | 106 |
| santander | 1734 | 1730 | 4 | 103 | 1 | 101 | 1836 | 1731 | 105 |
| segovia | 2632 | 2353 | 279 | 18 | 36 | -18 | 2650 | 2389 | 261 |
| sevilla | 979 | 1111 | -132 | 488 | 247 | 241 | 1467 | 1358 | 109 |
| soria | 3038 | 2640 | 398 | 16 | 20 | -4 | 3054 | 2660 | 395 |
| tarragona | 1279 | 1313 | -34 | 597 | 132 | 465 | 1876 | 1445 | 432 |
| teruel | 2882 | 2479 | 403 | 36 | 40 | -4 | 2918 | 2519 | 399 |
| toledo | 1807 | 1763 | 45 | 222 | 174 | 48 | 2030 | 1936 | 93 |
| valencia | 1335 | 1349 | -14 | 692 | 83 | 609 | 2027 | 1433 | 595 |
| valladolid | 2506 | 2329 | 176 | 15 | 48 | -33 | 2521 | 2378 | 143 |
| vitoria | 2676 | 2529 | 147 | 3 | 2 | 1 | 2679 | 2531 | 148 |
| zamora | 2447 | 2240 | 207 | 14 | 48 | -33 | 2461 | 2287 | 174 |
| zaragoza | 1968 | 1909 | 59 | 154 | 99 | 55 | 2122 | 2008 | 114 |

Tabla 22. Potencial de ahorro, en MJ/año/persona, para hoteles (IDA-2)

Y representado los valores de la diferencia de ahorro para cada uno de los sistemas de recuperación sobre el mapa peninsular, se obtiene:

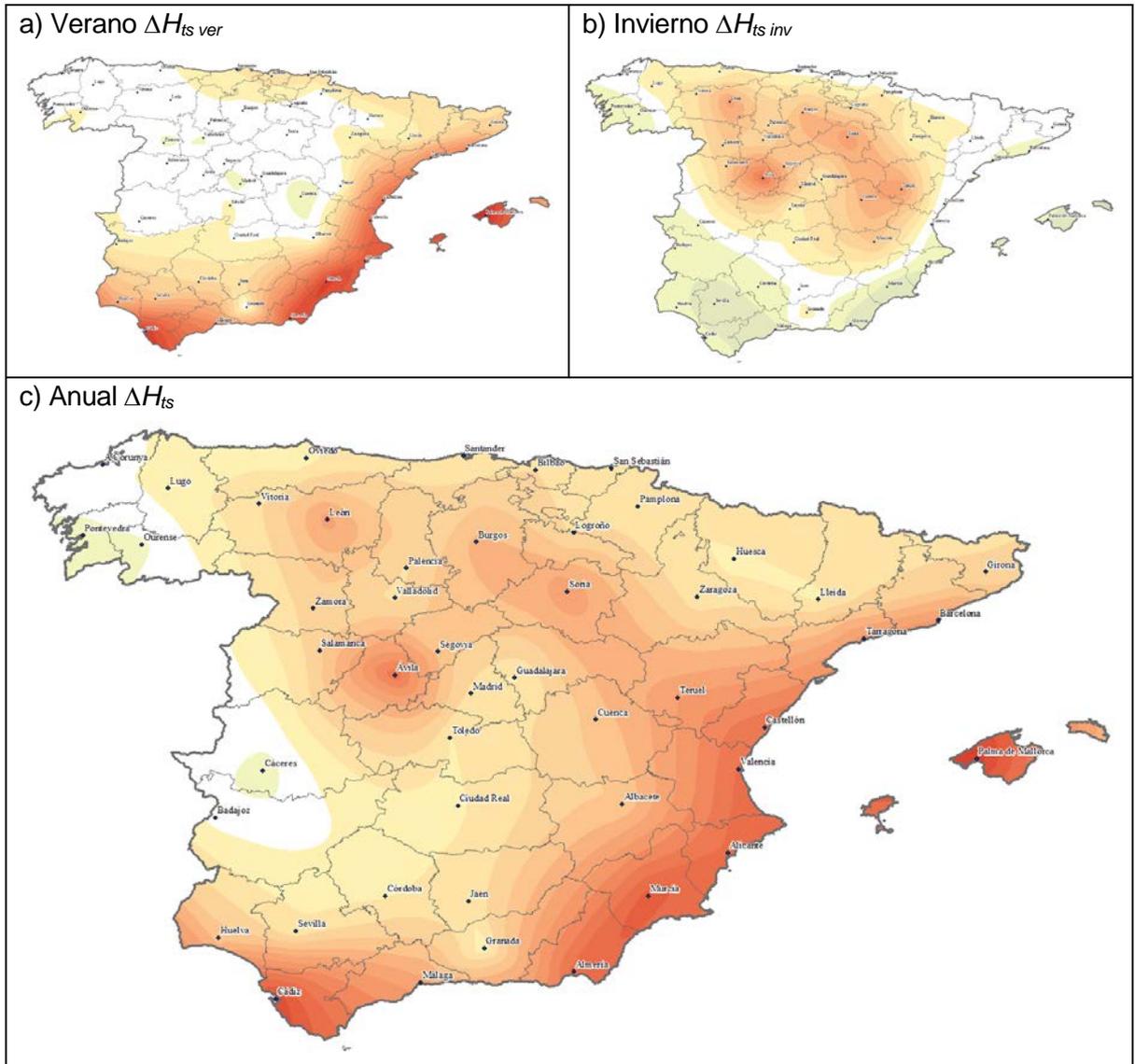


Fig. 54 Potencial de recuperación por persona en hotel: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

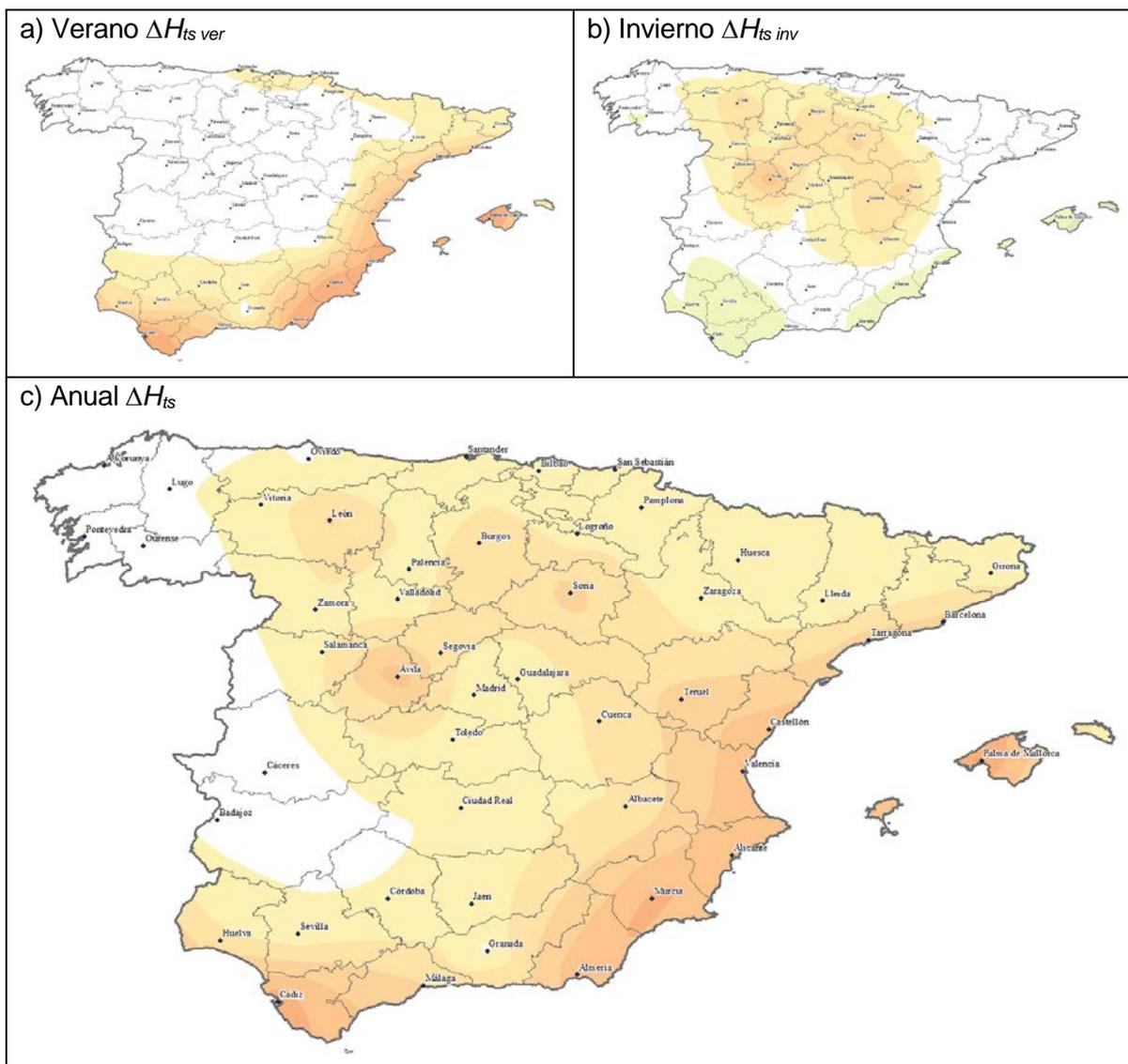


Fig. 55 Potencial de recuperación por kgas en hotel: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

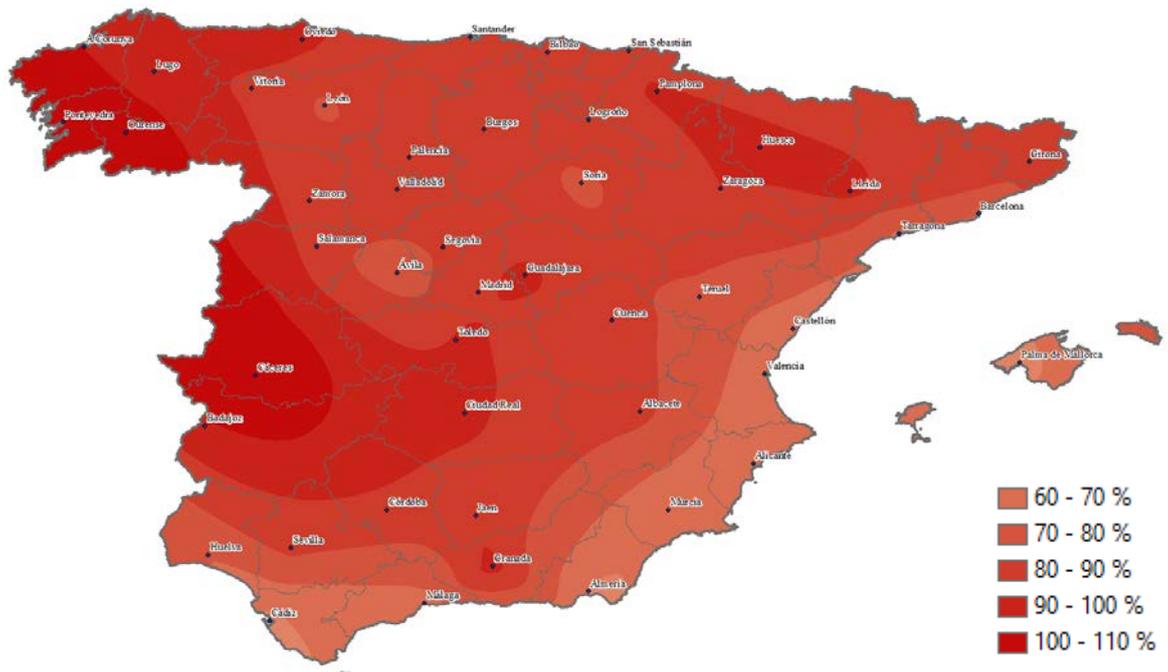


Fig. 56 Pérdida % potencial de recuperación anual H_f : hotel vs máximo.

A la vista de los resultados, para el caso de hoteles, aun habiendo una reducción del ahorro conseguido, ésta es menor debido a que el sistema está más horas en funcionamiento.

4.4.5. Centros de Atención Primaria (CAP's)

Aplicando el factor de ocupación en centros de atención primaria de la Tabla 12, se obtienen los resultados que muestra la siguiente tabla:

| Población | $H_{t_{inv}}$ | $H_{s_{inv}}$ | $\Delta H_{ts_{inv}}$ | $H_{t_{ver}}$ | $H_{s_{ver}}$ | $\Delta H_{ts_{ver}}$ | H_t | H_s | ΔH_{ts} |
|---------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|-----------------------|-------|-------|-----------------|
| albacete | 690 | 601 | 89 | 46 | 58 | -12 | 736 | 659 | 77 |
| alicante | 254 | 276 | -22 | 301 | 76 | 225 | 555 | 352 | 202 |
| almeria | 198 | 233 | -35 | 317 | 74 | 243 | 515 | 307 | 208 |
| avila | 979 | 772 | 207 | 0 | 7 | -7 | 979 | 778 | 201 |
| badajoz | 381 | 409 | -28 | 133 | 104 | 29 | 514 | 514 | 1 |
| barcelona | 434 | 462 | -28 | 188 | 26 | 161 | 622 | 489 | 133 |
| bilbao | 508 | 516 | -8 | 59 | 8 | 52 | 567 | 523 | 44 |
| burgos | 901 | 816 | 85 | 5 | 4 | 1 | 906 | 820 | 86 |
| caceres | 431 | 448 | -17 | 72 | 92 | -19 | 503 | 539 | -36 |
| cadiz | 201 | 232 | -30 | 333 | 38 | 295 | 534 | 269 | 265 |
| castello | 344 | 353 | -9 | 254 | 54 | 200 | 598 | 407 | 191 |
| ciudadreal | 560 | 543 | 17 | 87 | 81 | 5 | 647 | 625 | 22 |
| cordoba | 320 | 344 | -25 | 180 | 136 | 44 | 500 | 480 | 20 |
| cuenca | 753 | 654 | 99 | 6 | 38 | -33 | 759 | 692 | 66 |
| gerona | 544 | 547 | -3 | 101 | 34 | 67 | 645 | 581 | 64 |
| granada | 521 | 482 | 39 | 57 | 86 | -29 | 578 | 568 | 10 |
| guadalajara | 608 | 582 | 26 | 63 | 52 | 12 | 671 | 634 | 38 |
| huelva | 218 | 245 | -27 | 183 | 84 | 99 | 400 | 329 | 72 |
| huesca | 640 | 611 | 29 | 43 | 43 | 0 | 683 | 654 | 29 |
| jaen | 392 | 408 | -16 | 149 | 113 | 36 | 541 | 521 | 20 |
| lacoruna | 487 | 500 | -13 | 2 | 0 | 1 | 488 | 500 | -11 |
| leon | 869 | 747 | 123 | 6 | 10 | -5 | 875 | 757 | 118 |
| lerida | 577 | 552 | 25 | 86 | 62 | 24 | 663 | 614 | 48 |
| logrono | 662 | 607 | 55 | 37 | 33 | 4 | 699 | 640 | 59 |
| lugo | 758 | 764 | -7 | 1 | 0 | 1 | 758 | 764 | -6 |
| madrid | 626 | 545 | 82 | 11 | 54 | -43 | 637 | 599 | 39 |
| malaga | 227 | 255 | -28 | 221 | 64 | 157 | 448 | 319 | 129 |
| murcia | 302 | 330 | -28 | 315 | 46 | 269 | 617 | 376 | 241 |
| oreense | 501 | 525 | -25 | 55 | 38 | 17 | 555 | 563 | -8 |
| oviedo | 609 | 618 | -9 | 12 | 1 | 11 | 621 | 619 | 2 |
| palencia | 748 | 703 | 45 | 14 | 12 | 3 | 762 | 715 | 47 |
| palmamallorca | 276 | 313 | -37 | 357 | 53 | 303 | 633 | 367 | 266 |
| pamplona | 708 | 666 | 41 | 10 | 11 | -1 | 718 | 677 | 41 |
| pontevedra | 410 | 435 | -26 | 25 | 11 | 14 | 435 | 447 | -12 |
| salamanca | 750 | 689 | 61 | 11 | 18 | -7 | 761 | 706 | 55 |
| sansebastian | 581 | 602 | -20 | 48 | 1 | 47 | 629 | 603 | 27 |
| santander | 505 | 517 | -11 | 41 | 1 | 40 | 547 | 518 | 29 |
| segovia | 811 | 696 | 114 | 11 | 22 | -11 | 822 | 718 | 103 |
| sevilla | 249 | 288 | -39 | 183 | 137 | 46 | 432 | 424 | 7 |
| soria | 908 | 764 | 144 | 10 | 12 | -2 | 918 | 776 | 142 |
| tarragona | 351 | 353 | -2 | 223 | 75 | 148 | 574 | 428 | 145 |
| teruel | 861 | 698 | 163 | 21 | 24 | -3 | 883 | 723 | 160 |
| toledo | 498 | 484 | 14 | 122 | 100 | 22 | 619 | 584 | 36 |
| valencia | 356 | 350 | 6 | 243 | 48 | 195 | 600 | 399 | 201 |
| valladolid | 720 | 667 | 53 | 9 | 30 | -21 | 729 | 697 | 32 |
| vitoria | 772 | 743 | 29 | 2 | 2 | 0 | 774 | 744 | 30 |
| zamora | 720 | 652 | 68 | 8 | 29 | -21 | 728 | 680 | 47 |
| zaragoza | 582 | 543 | 39 | 77 | 59 | 18 | 659 | 602 | 57 |

Tabla 23. Potencial de ahorro, en MJ/año/persona, para un CAP (IDA-3)

Y representado los valores de la diferencia de ahorro para cada uno de los sistemas de recuperación sobre el mapa peninsular, se obtiene:

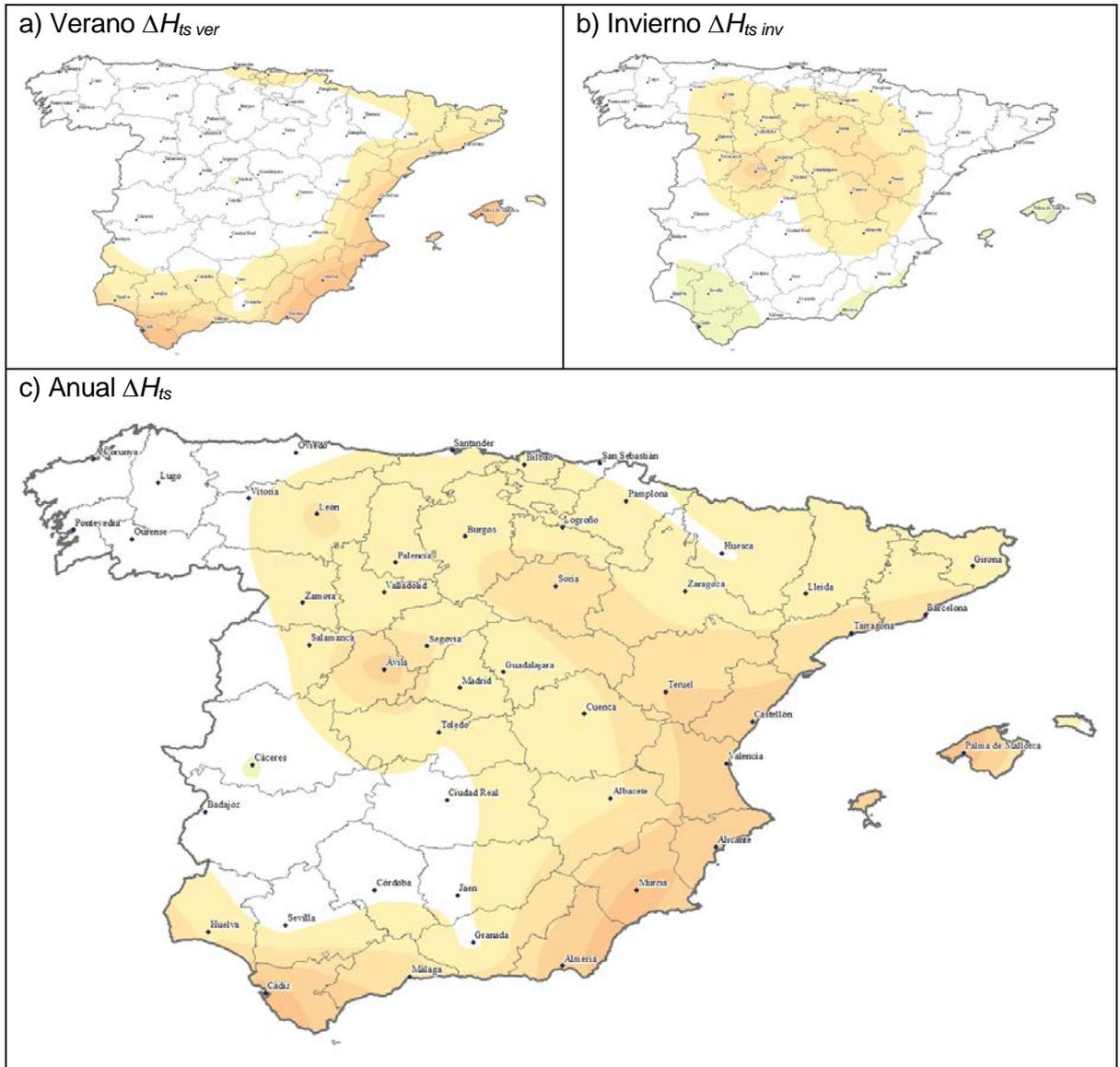


Fig. 57 Potencial de recuperación por persona en CAP's: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

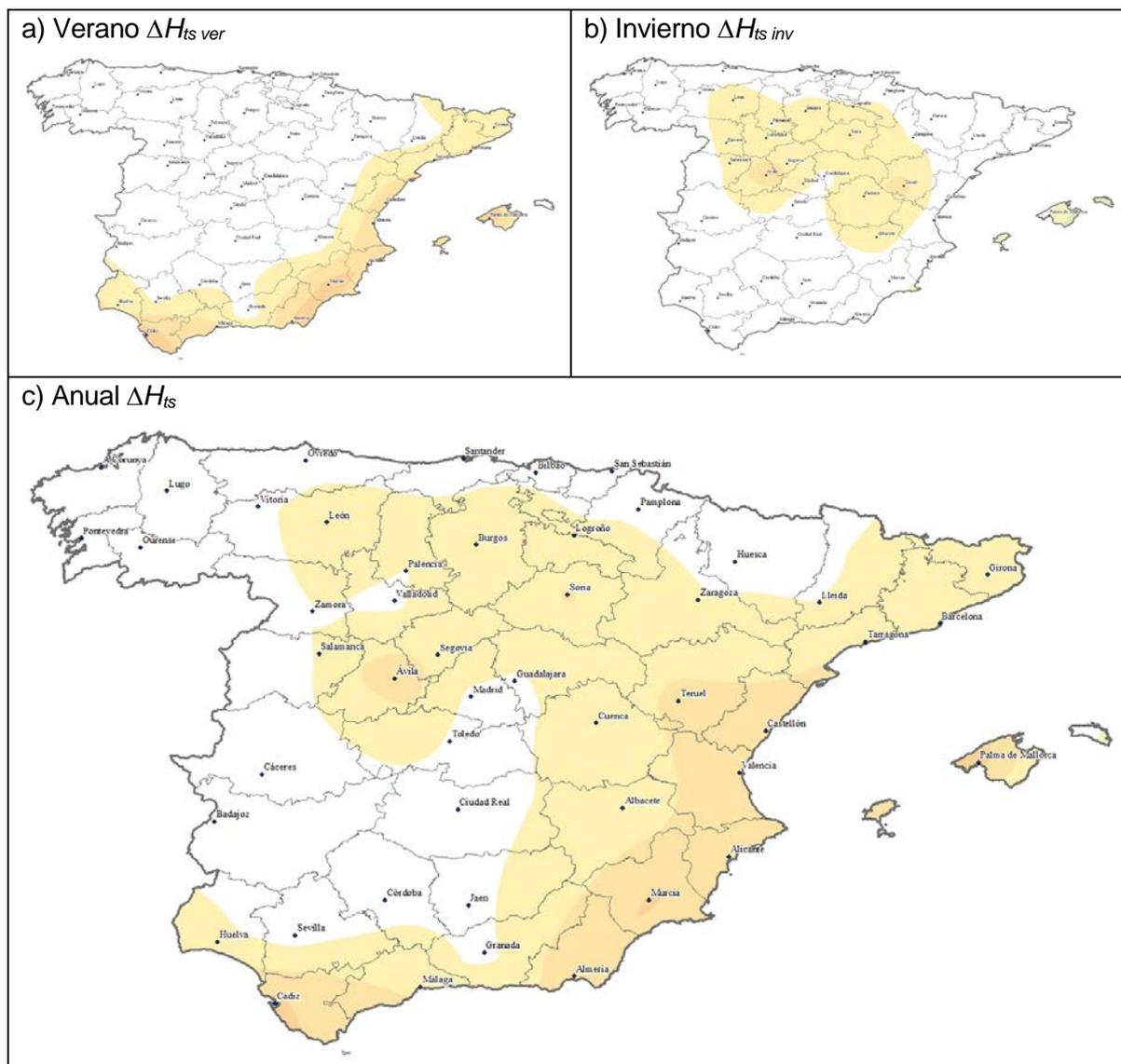


Fig. 58 Potencial de recuperación por kg_{as} en CAP's: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

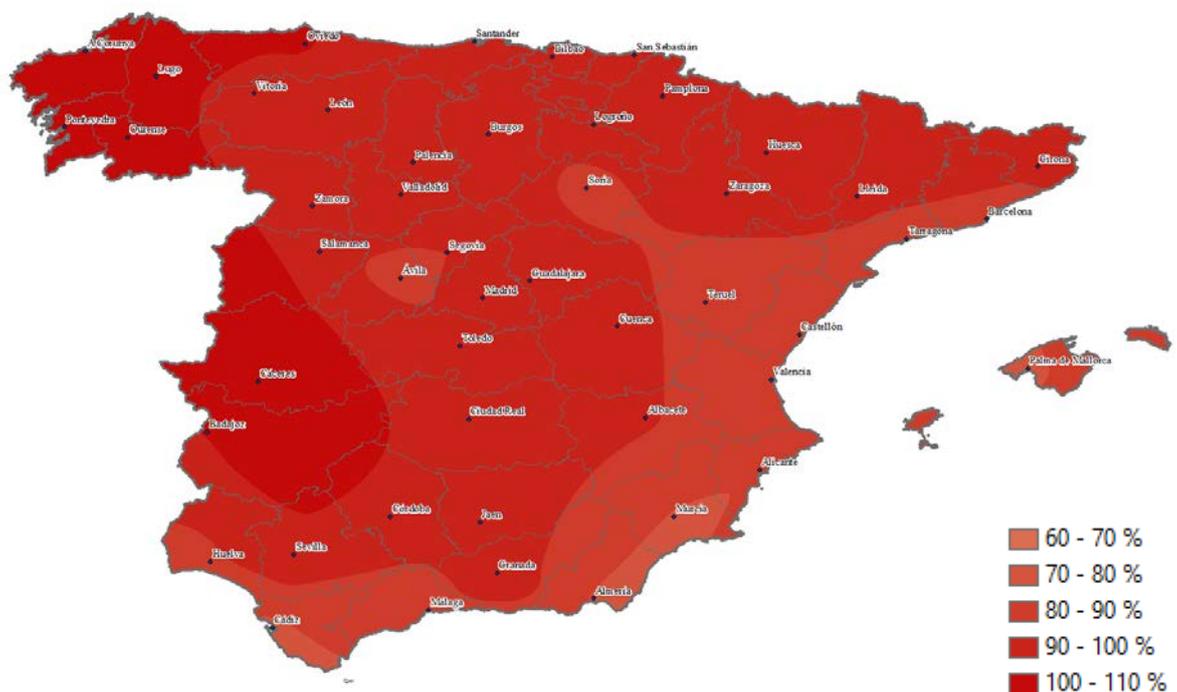


Fig. 59 Pérdida % potencial de recuperación anual H_i : CAP vs máximo.

Para este tipo de centros, igual que sucede con el resto de edificios analizados, el hecho de incorporar un perfil de ocupación al funcionamiento del sistema, éste repercute directamente en una reducción del potencial de ahorro.

La conclusión a la que se llega es que, todo y la reducción de ahorro que se produce por el mero hecho de que el sistema está menos horas en funcionamiento, la tendencia general es que los ERV siguen consiguiendo mayores ahorros energéticos que los HRV. Ahora bien, se ha de tener en cuenta que, en algunas poblaciones, la tendencia se ha invertido, debido a la reducción de horas y en que las horas que éstos están en funcionamiento, la carga sensible de ventilación es superior a la latente.

4.5. Mapas con fluctuación de humedad relativa interior

4.5.1. Límites de fluctuación según condiciones de confort RITE [5]

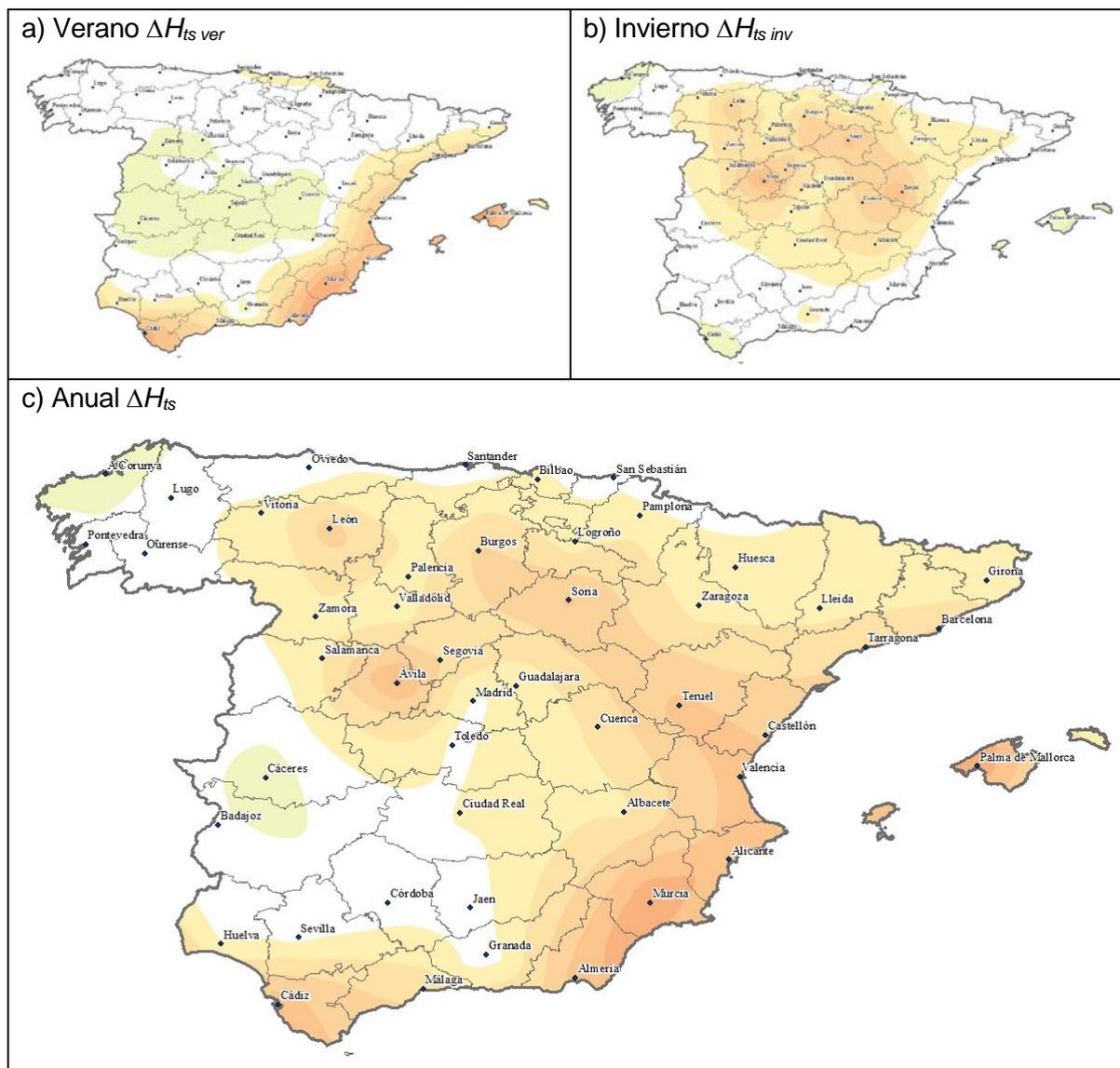


Fig. 60 Potencial de recuperación con fluctuación límite RITE: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}



Fig. 61 Variación % potencial de recuperación con fluctuación límite RITE vs máximo.

4.5.2. Límites de fluctuación RITE extendidos

Tal como se ha comentado en el apartado 3.8.2.2 se pueden extender tanto el límite inferior de humedad relativa interior en verano, como el límite superior en invierno, más allá de los valores marcados como de confort por el RITE, sin que ello suponga un problema en el confort para la instalación.

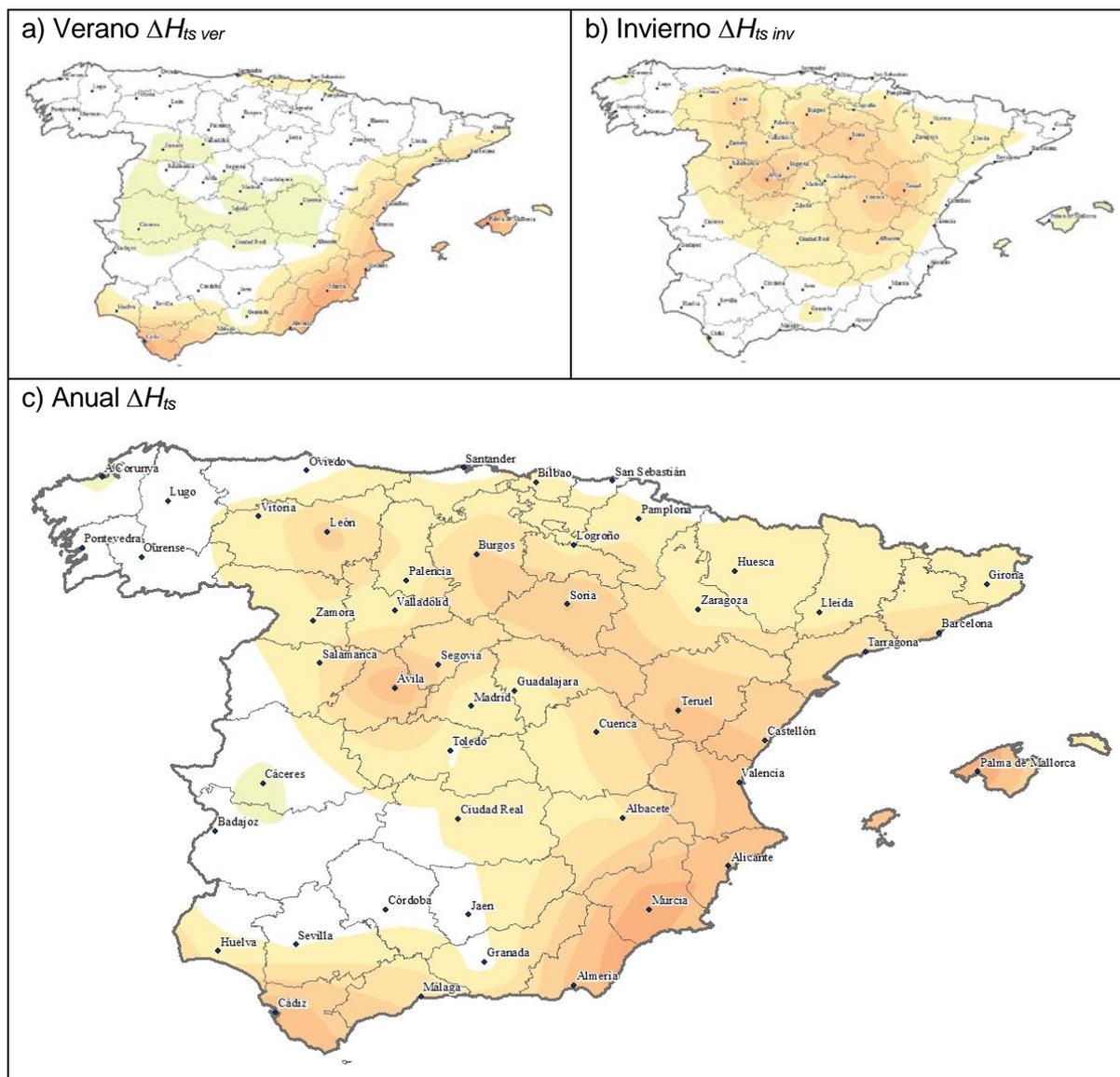


Fig. 62 Potencial de recuperación con fluctuación RITE extendida: $\Delta H_{ts\ ver}$, $\Delta H_{ts\ inv}$, ΔH_{ts}

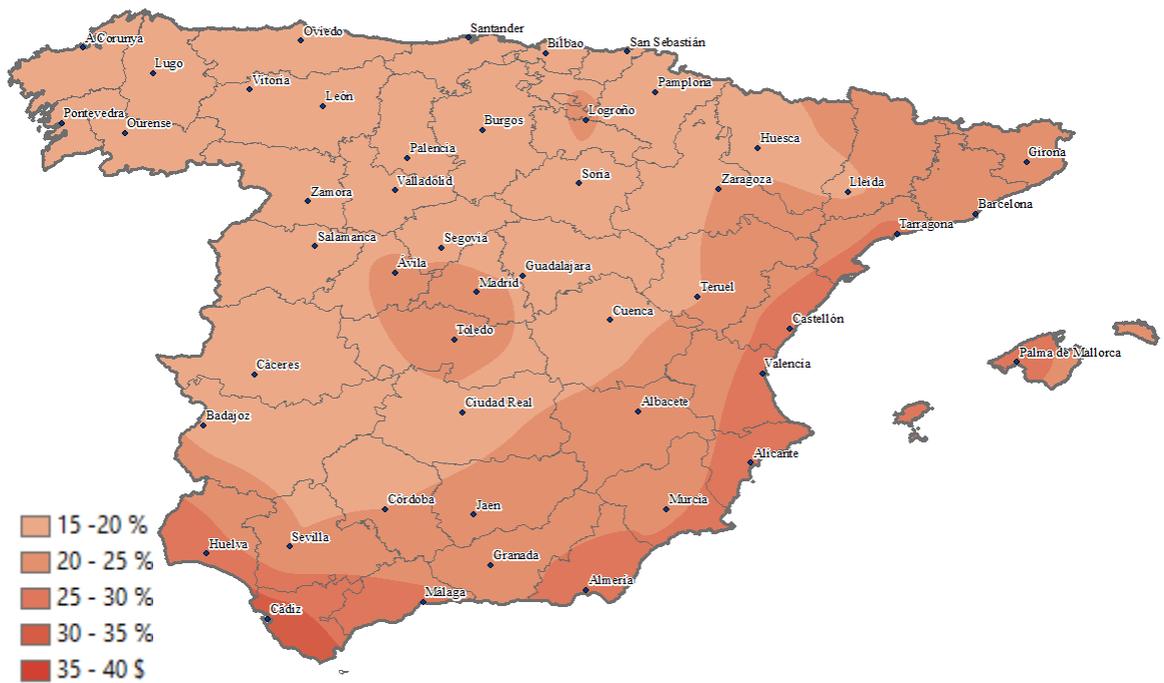


Fig. 63 Variación % potencial de recuperación con fluctuación RITE extendida vs máximo.



5. Estudio de análisis inmediato

5.1. Objetivo

Una vez se ha obtenido el mapa donde se muestra el potencial de ahorro de los recuperadores entálpicos respecto los sensibles a partir de los datos climáticos horarios de cada localidad, la pregunta que se presenta es si sería posible obtener unos resultados similares a los del mapa de la Fig. 42 (potencial anual de recuperación sensible y total), utilizando alguna característica o variable climática sencilla, que proporcionara de forma rápida una idea cualitativa del potencial de ahorro de los ERV frente a los HRV, sin tener que partir de partir de los datos climáticos horarios de cada localidad.

5.2. Opciones estudiadas

5.2.1. Zonas climáticas

Una vez se ha obtenido el mapa donde se muestra el potencial de ahorro de los recuperadores entálpicos respecto los sensibles a partir de los datos climáticos horarios de cada localidad, la pregunta que se presenta es, si sería posible asociar este potencial de ahorro a otros parámetros más sencillos de determinar u obtener, de forma que la elección de qué tipología de recuperador es el más aconsejable utilizar con el fin de obtener este mayor ahorro sea rápida y precisa, como podría ser con la asociación a la zona climática a la que pertenece la localidad o bien a datos medios anuales.

En primer lugar, se pretendió caracterizar la climatología de España según detalla ASHRAE (Standard 90.1, "*Energy Standards for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*") [43] y no se obtuvieron los resultados esperados, básicamente debido a los criterios utilizados para la caracterización de cada zona. Un segundo paso fue la de adaptar los criterios a las características del clima de España. Tampoco se obtuvieron los resultados esperados. Se dedujo que el problema se debía a que para la caracterización de las zonas climáticas no se utilizaban parámetros que indicaran el nivel energético del aire (entalpía), necesarios para poder determinar el grado de recuperación por comparación con el del aire interior, aun teniendo en cuenta datos como la pluviometría.

Se partió de las 8 zonas climáticas que se describen para Norte América [44], y se intentaron asociar la descripción de estas zonas a las características climáticas de la península española. Dichas zonas climáticas se describen como:

- Hot-Humid
- Mixed-Humid
- Hot-Dry
- Mixed-Dry
- Cold
- Very-Cold
- Subarctic
- Marine

Para ello se tuvieron que conseguir, a parte de los datos climáticos que ya se disponía, de la pluviometría de cada una de las ciudades. Esta información se extrajo de los datos facilitados por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente [50].

Así pues, aplicando la descripción de cada zona climática a la península, el mapa de zonas climáticas quedaría de la siguiente forma:

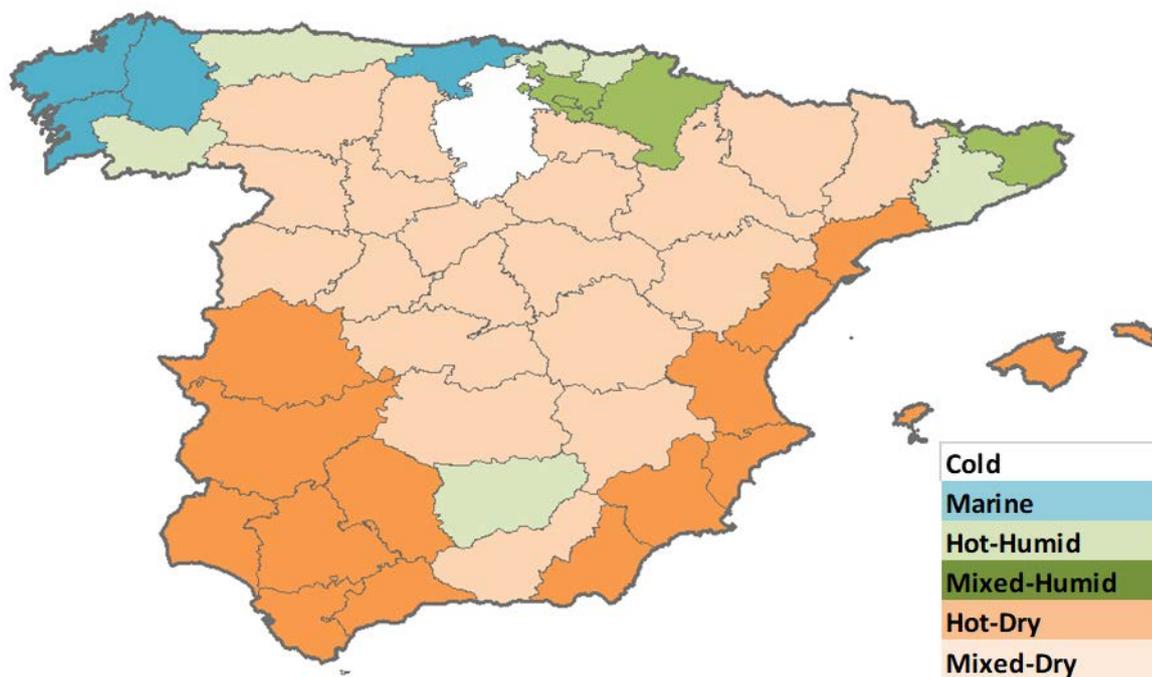


Fig. 64. Zonas climáticas según clasificación ASHRAE

Comparando este mapa con el obtenido del potencial de recuperación de calor (Fig. 42) se puede desprender que no existe una correlación clara entre dichas zonas climáticas y el potencial de ahorro.

El siguiente paso que se hizo fue la de intentar asociar las diferentes zonas climáticas peninsulares según la clasificación histórica de Köppen-Geiger [51] al mapa de potencial de ahorro. Esta clasificación se divide básicamente en 5 grupos, más 2 subgrupos:

- A: Climas cálidos (ningún mes con temperatura inferior a 18 °C)
- B: Climas secos (áridos o desérticos; la evaporación excede a las lluvias medias anuales)
- BS: Climas de estepa (precipitaciones entre 380 y 760 mm)
- BW: Climas desérticos (< 250 mm de precipitaciones)
- C: Climas templados. (el mes más frío superior a los -3 °C e inferior a los 18 °C)
- D: Clima de nieves (el mes más frío tiene una media superior a -3 °C y el más cálido es superior a los 10 °C)
- E: Climas de hielo (ningún mes alcanza los 10 °C)

En este caso los resultados fueron similares que para el estudio anterior. El motivo recae básicamente en que, en todos los casos, las zonas climáticas se clasifican por 2 parámetros (temperatura y precipitación) cuya representación no tiene por qué coincidir con los parámetros utilizados para el cálculo del potencial de ahorro (temperatura y humedad absoluta).

Viendo que era muy difícil poder asociar el potencial de ahorro, es decir, poder llegar a escoger cual es el recuperador más interesante a utilizar en base a las zonas climáticas definidas para la Península Ibérica, se decidió intentar asociar este potencial de ahorro a una única magnitud que fuera sencilla de procesar, siendo ésta, la humedad absoluta.

5.2.2. La humedad absoluta media como magnitud clave

Pasamos entonces a analizar diferentes valores medios y máximos en invierno y verano, de algunas variables relacionadas con la humedad. Se calculó la temperatura media y consideramos la entalpía y la humedad absoluta coincidentes durante el verano y el invierno (aplicando diversas hipótesis en cuanto a la duración en ambas estaciones). También se consideró utilizar las condiciones de temperatura y humedad empleadas para el cálculo de las cargas de calefacción y refrigeración con percentil del 1% (IDAE [45]).

Los mejores resultados se obtuvieron utilizando la humedad absoluta coincidente con la temperatura media para 4 meses de invierno (noviembre, diciembre, enero y febrero) y para 3 meses de verano (junio, julio y agosto).

$$\Delta w = |\bar{w}_o - w_i|_{inv} + |\bar{w}_o - w_i|_{ver} \quad \text{ec. 32}$$

Se calcula para las 48 ciudades, la diferencia de ésta humedad absoluta entre exterior e interior, en verano e invierno, y se representó mediante curvas de nivel, la suma de ambos valores en el mapa con los resultados de la Fig. 65.

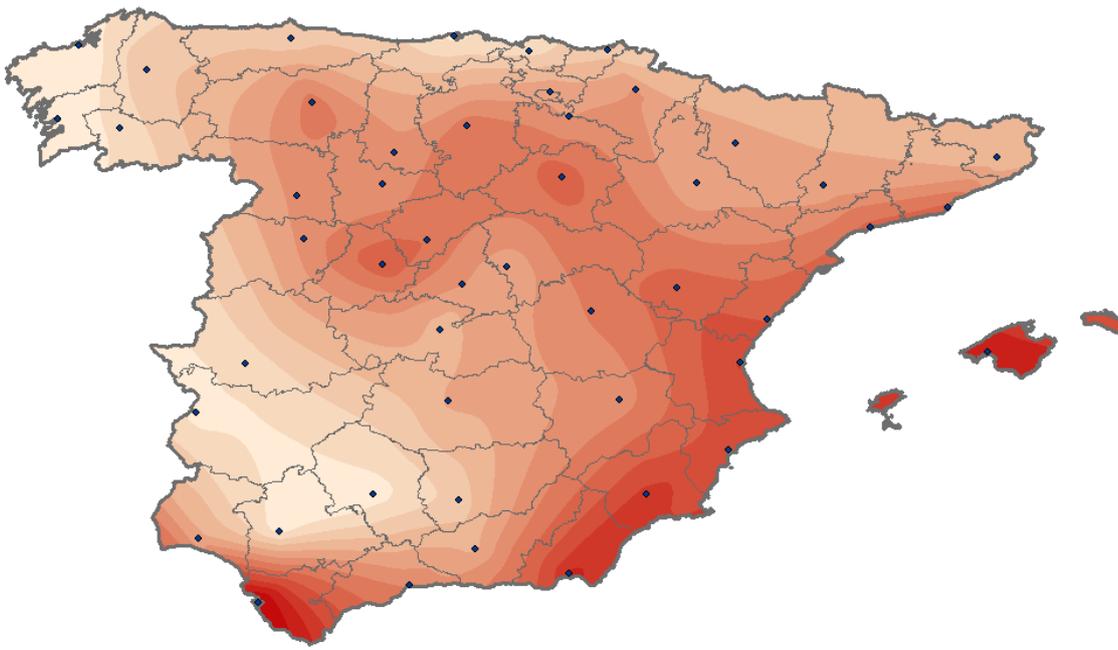


Fig. 65. Diferencia humedad absoluta media exterior e interior (verano + invierno)

En el mapa anterior no tiene importancia la escala de valores utilizada, pues es meramente cualitativa. Lo realmente importante del mismo es, la extraordinaria similitud que se observa con el del potencial máximo de recuperación anual Fig. 42, lo cual significa que gracias a una variable tan sencilla como la humedad absoluta media exterior, se puede identificar de forma rápida si cualitativamente resulta más interesante utilizar un ERV frente a un HRV, sin necesidad de entrar en un análisis más complicado hora a hora, el cual obviamente sí es necesario si se desea cuantificar la magnitud de la recuperación de energía conseguida.

5.3. Comparativa de resultados

Para visualizar mejor la similitud entre los resultados del estudio mediante la simulación hora a hora a lo largo del año ΔH_{ts} , y el obtenido mediante el análisis cualitativo inmediato con la diferencia de humedades absolutas Δw , se representan uno junto a otro los mapas con los resultados obtenidos en cada caso.

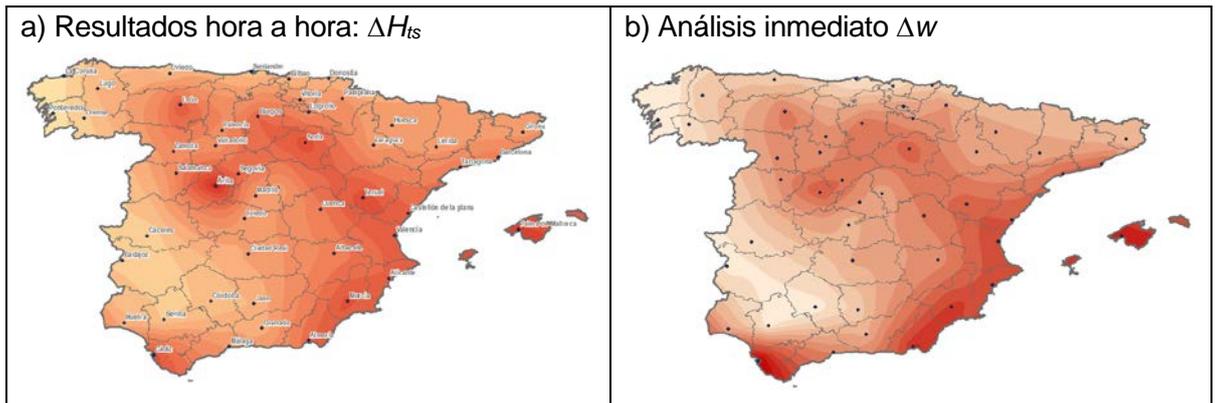


Fig. 66. Diferencia humedad absoluta media exterior e interior (verano + invierno)

Como puede verse ambos mapas son extraordinariamente semejantes a nivel cualitativo, lo cual corrobora que se podría utilizar la diferencia de humedades absolutas que se ha descrito en la ec. 32 como alternativa inmediata para la toma de decisiones respecto a si el recuperador entálpico es o no el más recomendable según la localización geográfica.

6. Conclusiones

Como aspectos más relevantes de este trabajo, en el que se ha desarrollado una metodología para determinar el potencial máximo de recuperación de energía, partiendo de las condiciones del ambiente exterior a lo largo del año, podemos destacar los siguientes:

- Obtención de un mapa con curvas de nivel que cuantifican de forma concreta el potencial máximo de recuperación de energía adicional que supone instalar un recuperador entálpico frente a uno sensible, en función de la ubicación.

Ello representa una herramienta muy útil, que facilita enormemente y aporta luz aportando valores concretos, en la toma de decisiones ante el clásico dilema de cuál de los dos tipos de recuperador es recomendable instalar.

Además, al poder mostrar los datos segregados, en temporada de verano y de invierno, se puede concretar con más precisión los motivos por los que unos son más ventajosos que los otros.

- Destacar también que, en la búsqueda de una alternativa más sencilla e inmediata, que no requiriera del historial de condiciones climáticas, se ha podido comprobar que una variable tan sencilla como la diferencia del valor medio, en verano e invierno, entre la humedad absoluta exterior e interior, identifica cualitativamente con bastante precisión, las zonas donde el uso de ERV es recomendable frente a los HRV, lo cual podría ser un criterio rápido y fiable para una recomendación preliminar.

Ello se pone de manifiesto ante la gran similitud que muestran las curvas de nivel de los mapas utilizando ambas opciones.

- Los resultados obtenidos, indican que el uso de las zonas climáticas no es un parámetro que sirva de referencia sobre qué tipo de recuperador utilizar, pues no se aprecia correlación entre ellas y el potencial añadido de recuperación que los de tipo entálpico tienen frente a los de tipo sensible.
- La simulación, aunque centrada en localidades españolas, es exportable de manera inmediata a cualquier zona, pudiendo replicarse los resultados obtenidos para cualquier otro país o región.
- Se propone un protocolo alternativo al tradicional, para la regulación de los ERV, el cual permitirá conseguir un ligero incremento de la recuperación de energía, sin que ello suponga ningún coste adicional en la instalación.

- Se demuestra como erróneo el criterio tradicional de recomendar ERV únicamente en zonas con alta humedad relativa en verano (ej. Barcelona).

Los resultados indican que es especialmente en zonas frías del interior donde los ERV son altamente recomendables debido a la baja humedad absoluta exterior en invierno. Además, en estos casos, el uso de los ERV facilita alcanzar humedades interiores, más próximas a la zona de confort, y dentro del margen que permite la normativa, sin necesidad de tener de emplear humidificadores de vapor, con el con el elevado consumo añadido que estos representan.

- Se ha evaluado la disminución del potencial de ahorro en aquellas instalaciones que no dispongan de control de la humedad en el interior del edificio.
- También se ha podido observar la influencia que tiene la tipología de edificio, así como el perfil de ocupación, sobre los ahorros energéticos que se pueden conseguir con las diferentes tipologías de recuperador, facilitando en cada caso la decisión por uno y otro tipo de recuperador.

Se ha puesto de manifiesto en definitiva que, para un edificio concreto con un perfil de ocupación determinado, para una localidad fijada, la herramienta de simulación desarrollada permite de forma muy sencilla poder determinar el potencial de ahorro energético que se obtendría con cada tipo de recuperador.

7. Trabajos futuros

Como extensión del estudio realizado en esta tesis se puede tener:

- un estudio económico que contemple el coste de inversión y explotación para cada tipología de recuperador, frente los ahorros que se pueden llegar a conseguir con ellos.
- el análisis de la influencia de la eficiencia del recuperador (función del caudal de aire que circula y temperaturas) sobre los resultados obtenidos.
- el análisis del impacto medioambiental que supone la incorporación de un tipo u otro de recuperador de calor en una instalación de ventilación.
- El análisis de la mejora del ahorro energético con la incorporación de un sistema de humidificación adiabática sobre el aire de extracción.

8. Bibliografía

- [1] L. Perez-Lombard, J.Ortiz, C.Pont. A review of building energy consumption information. *Energy and Buildings* 40 (2008) 394-398.
- [2] ASHRAE, *ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI)*, ASHRAE, 1791 Tullie Circle, Atlanta, GA 30329, (2013).
- [3] European Commission. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the EU* (18.06.2010), L153 13-35.
- [4] ASHRAE Standard 62.1-2013. Ventilation for acceptable Indoor Air Quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta. 2013.
- [5] RITE. Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Spain. 2013, y sus posteriores revisiones.
- [6] Zeng, C. and Liu, S. and Shukla, A., 2017. A review on the air-to-air heat and mass exchanger technologies for building applications. *Renew. Sustain. Energy. Rev.*, 75, 753-774.
- [7] IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Guía técnica de ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización*. Madrid, 2010.
- [8] F.J. Rey, E. Velasco. Experimental study of indoor air quality, energy saving and analysis of ventilation norms in climatized areas. *Energy and Buildings* 33 (2000) 57-67.
- [9] ASHRAE Handbook of HVAC Systems and Equipment, 2016. Chapter 26: Air-to-Air Energy Recovery Equipment
- [10] Jeong, J.W. and Mumma, S.A., 2005. Practical thermal performance correlations for molecular sieve and silica gel loaded enthalpy wheels. *Applied Thermal Engineering*, 25, 719-740
- [11] Woods, J., 2014. Membrane processes for heating, ventilation and air conditioning. *Renew. Sustain. Energy. Rev.*, 33, 290-304.
- [12] Al-Waked, R. and Nasif, M.S. and Morrison, G. and Behnia, M., 2015. CFD simulation of air to air enthalpy heat exchanger: Variable membrane moisture resistance. *Applied Thermal Engineering*, 84, 301-309.

- [13] Min, J. and Duan, J., 2015. Membrane-type total heat exchanger performance with heat and moisture transferring in different directions across membranes. *Applied Thermal Engineering*, 91, 1040-1047.
- [14] Deshko, V.I. and Karvatskii, A.Y. and Shkhodub, I.O., 2016.. Heat and mass transfer in cross-flow air-to-air membrane heat exchanger in heating mode. *Applied Thermal Engineering*, 100, 133-145.
- [15] Alonso, M.J. and Mathisen, H.M. and Aarnes, S. and Liu, P., 2017. Performance of a lab-scale membrane-based energy exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 111, 1244-1254.
- [16] Liu, J. and Li, W. and Liu, J. and Wang, B., 2010. Efficiency of energy recovery ventilator with various weathers and its energy saving performance in a residential apartment. *Energy and Buildings*, 42, 43-49.
- [17] Dodon, A. and Gustavsson, L. and Sathre, R., 2011. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings. *Energy and Buildings*, 43, 1566-1572.
- [18] Zhang, J. and Fung, A.S. and Jhingan, S., 2014. Analysis and feasibility study of residential integrated heat and energy recovery ventilator with built-in economizer using an excel spreadsheet program. *Energy and Buildings*, 75, 430-438.
- [19] NG, L.C. and Payne, W.V. 2016. Energy use consequences of ventilating a net-zero energy house. *Applied Thermal Engineering*, 96, 151-160.
- [20] Rasouli, M. and Ge, G. and Simonson, C.J. and Besant, R.W. 2013. Uncertainties in energy and economic performance of HVAC systems and energy recovery ventilators due to uncertainties in building and HVAC parameters. *Applied Thermal Engineering*, 50, 732-742.
- [21] Kang, Y. and Wang, Y. and Zong, K. and Liu, J., 2010. Temperature ranges of application of air-to-air heat recovery ventilator in supermarkets in winter, China. *Energy and Buildings*, 42, 2289-2295.
- [22] Zhong, K. and Chen, S. and Kang, Y. and Yuan, L., 2012. Analysis of outdoor temperature ranges for the operation of different ventilating modes in commercial buildings in China. *Energy and Buildings*, 55, 174-182.
- [23] Wang, L. and Curcija, D. and Breshears, J., 2015. The energy saving potentials of zone-level membrane-based enthalpy recovery ventilators for VAV systems in commercial buildings. *Energy and Buildings*, 109, 47-52.

- [24] Klein, S.A, 2000. TRNSYS: A Transient System Simulation Program. Egeineering Experiment Station Report 38-13. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.
- [25] R.M. Lazzarin, A. Gasparella. Technical and economical analysis oh heat recovery in building ventilation systems. *Applied Thermal Engineering* 18 (1-2) (1998) 47-67.
- [26] Guillén-Lambea, S. and Rodríguez-Soria, B. and Marín, J.M., 2016. Evaluation of the potential energy recovery for ventilation air in dwellings in the South of Europe. *Energy and Buildings*, 128, 384-393.
- [27] Z. Ke, K. Yanming. Applicability of air-to-air heat recovery ventilators in China. *Applied Thermal Engineering* 129 (2009) 830-840.
- [28] Liu, P. and Mathisen H.M. and Alonso, M.J. and Simonson, C, 2017. A frosting limit model of air-to-air quasi-counter-flow membrane energy exchanger for use in cold climates. *Applied Thermal Engineering*, 111, 776-785
- [29] A. Dodon, L.Gustavsson, R. Sathre. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings. *Energy and Buildings* 43 (2011) 1566-1572.
- [30] Y.P. Zhou, J.Y. Wu, R.Z. Wang. Performance of energy recovery ventilator with various weathers and temperature set points. *Energy and Buildings* 39 (12) (2007) 1202-1210.
- [31] M. Rasouli, C.J. Simonson, R.W. Besant. Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions. *Energy and Buildings* 54 (2012) 29-39.
- [32] Y. Kang, Y. Wang, K. Zong, J. Liu. Temperature ranges of application of air-to-air heat recovery ventilator in supermarkets in winter, China. *Energy and Buildings* 42 (2010) 2289-2295
- [33] K. Zhong, S. Chen, Y. Kang, L. Yuan. Analysis of outdoor temperature ranges for the operation of different ventilating modes in commercial buildings in China. *Energy and Buildings* 55 (2012) 174-182.
- [34] R.W.Besant, C.J.Simonson. Air-to-air heat exchangers. *ASHRAE Journal* 45 (4) (2003) 45-52.
- [35] Beattie, C. and Fazio, P. and Zmeureanu, R. and Rao, J., 2017. Experimental study of air-to-air heat exchangers for use in arctic housing. *Applied Thermal Engineering*, 129, 1281-1291.

- [36] Xiaohang FENG, Da YAN, Tianzhen HONG. Simulation of Occupancy in Buildings. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, May 2015.
- [37] Simona D'Oca, Tianzhen HONG. Occupancy schedules learning process through a data mining framework. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, May 2015.
- [38] Caroline M. Clevenger, John Haymaker. The impact of the building occupant on energy modeling simulations.
- [39] AENOR, Norma Europea EN 14825. Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para calefacción y la refrigeración de locales. Ensayos y clasificación en condiciones de carga parcial, y cálculo del rendimiento estacional. Madrid, marzo de 2016
- [40] TRANE, Recirculation Energy Recovery Unit Controls. Engineering Bulletin, CLCH-PRB009-EN.
- [41] ASHRAE Journal, 2012. Total Energy Wheel Control In a Dedicated OA system.
- [42] IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Ahorro de energía mediante enfriamiento gratuito y recuperadores de calor con humectador adiabático en la extracción*. Madrid, noviembre de 2014.
- [43] ASHRAE Standard 90.1-2013. Energy Standards for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta. 2013.
- [44] U.S Department of Energy, Building Technologies Office, *Guide to Determining Climate Regions by County*. BUILDING AMERICA BEST PRACTICES SERIES, Volume 7.3. Agosto 2015.
- [45] IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Guía técnica de condiciones climáticas exteriores de proyecto*. Madrid, jun. 2010.
- [46] Gschwandtner WR, Münzberger H. Lipoatrophia semicircularis. *Ein Beitrag zu bandförmig-circulären Atrophien des subcutanen Fettgewebes im Extremitätenbereich*. Der Hautarzt 1974; 25: 222-227

Referencias WEB:

- [47] EnergyPlus, 2018. <http://www.energyplus.net/>
- [48] http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/carbon_dioxide/health_cd.html
- [49] <https://energyplus.net/weather/sources#SWEC>
- [50] http://sig.mapama.es/93/ClienteWS/siga/default.aspx?nombre=CH_EST_PLUMEDIA&claves=CLAVE&valores=8175
- [51] https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_clim%C3%A1tica_de_K%C3%B6ppen