



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería mecánica

**ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE
ACUMULACIÓN TÉRMICA EN PIEDRAS
PARA CLIMAS DESÉRTICOS.**

Autor:

Arranz Cerezo, Álvaro

Tutor:

Tejero González, Ana
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica

Valladolid, Febrero, 2016.

Agradecimientos

Este trabajo marca el final de una etapa, una etapa con momentos buenos y malos, con momentos difíciles y otros más sencillos de los que he aprendido lo más importante, es decir, a salir airoso y mirar siempre adelante.

Una etapa que me ha enseñado mucho acerca de lo que soy y lo que quiero ser pero que no hubiera sido posible sin la ayuda de las personas que han formado parte de ella, por ello, me gustaría dedicar unas líneas a todas aquellos que han hecho que todo esto fuese posible.

En primer lugar, quiero agradecer al Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica todo su apoyo y confianza, en especial al profesor D. Eloy Velasco Gómez y a mi tutora Dña. Ana Tejero González, por el aporte de sus conocimientos y la ayuda de ambos, tan útil para la realización de este trabajo.

También agradecer a mi novia, mis compañeros de clase y amigos, que día a día han compartido conmigo este largo camino, presenciando grandes momentos y haciendo todo más sencillo.

Pero en especial a mis padres por haberme proporcionado la mejor educación y lecciones de vida, por confiar en mí y por darme la oportunidad para hacer de todo esto, una realidad, sin olvidar al resto de mi familia, brindar por su apoyo y sus ánimos.

¡Gracias a todos vosotros!

Resumen

Este proyecto tiene como finalidad, el estudio de un sistema de acumulación de energía mediante piedras para alcanzar un confort térmico en el interior de una vivienda de manera energéticamente eficiente.

El motivo de este estudio, es la intención de implantar el sistema en la zona de Béni-Abbès, Argelia, donde existe un clima desértico en el que la variación de temperatura entre el día y la noche es lo suficientemente amplia para que este sistema sea viable.

Primero, se introduce una serie de conceptos clave, para comprender todo lo necesario en cuanto a ventilación y confort que se requiere en el interior de una vivienda, seguido de la normativa aplicable para asegurar dicho confort.

A continuación se realiza un desarrollo detallado de la instalación experimental donde se han tomado todos los datos del experimento, seguido de la calibración de los dispositivos de la instalación y los utilizados para la medición, así como la toma de datos.

Por último, se muestran todos los cálculos realizados para evaluar la viabilidad del estudio, así como las conclusiones finales, extraídas en base al análisis de los resultados obtenidos.

Se comprueba que el sistema es interesante para dicho ahorro, sobre todo en las zonas donde se puede aprovechar una amplia diferencia de temperatura, o en su defecto, un complemento que supone un ahorro económico y energético.

Palabras clave: Confort térmico, ahorro energético, acumulación térmica, piedras, cargas térmicas.

Abstract

This project focuses on an energy efficient storage system through pebbles in order to provide thermal comfort inside residential building, leading to energy savings.

This study is done with the intention of setting up the storage system in the area Béni-Abbes in Algeria. In this area, there is a desert climate wherein the change of temperature between night and day is wide enough so that this system can be viable.

Firstly, a number of key ideas are shown in order to understand everything necessary regarding the air circulation and thermal comfort is required inside the residential building, followed by the regulations applicable in order to ensure thermal comfort.

In addition, a detailed development of the experimental system is shown, where all the data from this test has been taken, followed by a calibration of all system devices both those used for the air circulation and those used for measuring, such as, the data collection.

Finally, all calculations have been done in order to assess the feasibility of this study in addition to the final conclusion on the basis of the analysis results obtained.

Key words: Thermal comfort, energy savings, energy storage, pebbles, thermal loads.

ÍNDICE

Agradecimientos	III
Resumen.....	V
Abstract.....	VII
Tabla de símbolos y abreviaturas.....	13
Justificación	15
Antecedentes.....	17
Objetivos	19
MEMORIA.....	21
Capítulo I: Estado del Arte	23
I.1 Calidad del ambiente interior.....	25
I.1.1 Introducción.....	25
I.1.2 Definición de Calidad de Ambiente Interior (IEQ)	25
I.1.3 Consecuencias sobre las personas	26
I.2 Confort térmico.....	28
I.2.1 Introducción.....	28
I.2.2 Diseño de las instalaciones.....	29
I.2.3 Parámetros de calidad ambiental.....	30
I.2.4 Sensaciones térmicas.....	31
I.3 Ventilación	32
I.3.1 Introducción.....	32
I.3.2 Caracterización de la ventilación	33
I.3.2.1 Renovaciones del aire	33
I.3.2.2 Caudal de aire	34
I.3.2.3 Edad del aire	34
I.3.2.4 Efectividad de la ventilación.....	35
I.3.3 Sistemas de ventilación.....	36
I.3.4 Sistemas de climatización todo aire.....	39
I.3.5 Normativa de ventilación.....	40

I.3.5.1 La norma Americana: ASHRAE 62-2004	40
I.3.5.2 La norma Europea: CEN 1752	40
I.3.5.3 El Código Técnico de Edificación: CTE –HS3	40
I.3.5.4 Reglamento Español de Instalaciones Técnicas en Edificios (RITE)	41
I.4 Sistema de almacenamiento de energía	42
I.5 Cargas térmicas.....	44
I.5.1 Introducción	44
I.5.2 Cálculo de cargas térmicas.....	45
I.5.2.1 Clasificación de cargas térmicas.....	45
Capítulo II: Desarrollo Experimental	47
II.1 Instalación experimental.....	49
II.1.1 Unidad de tratamiento de aire (UTA).....	49
II.1.2 Sistema de acumulación utilizado	50
II.1.3 Medición de caudal	51
II.1.3.1 Placas orificio.....	51
II.1.3.2 Transductor digital.....	52
II.1.4 Medición de temperatura	53
II.1.5 Elementos de distribución	55
II.2 Caracterización de las piedras	55
II.2.1 Densidad	55
II.2.2 Calor específico	58
II.3 Calibración de las placas orificio.....	59
II.4 Calibración sondas de temperatura.....	63
II.5 Toma de datos y diseño de experimentos	66
II.5.1 Año meteorológico tipo	74
Capítulo III: Cálculos y Resultados.....	75
III.1 Introducción	77
III.2 Análisis de datos.....	77
III.2.1 Análisis 1: 50 °C N.C: 3.	79
III.2.2 Análisis 2: T=35 °C N.C.: 3.	80
III.2.3 Análisis 3: T=30 °C N.C.: 3.	82

III.2.4	Análisis 4: T=40 °C, N.C.: 1.....	83
III.2.5	Análisis 5: T=25 °C. N.C.: 1.....	84
III.3	Cálculo de cargas térmicas	85
III.3.1	Cálculo de cargas térmicas de calefacción.....	85
III.3.2	Cálculo de cargas térmicas de refrigeración.....	86
III.4	Condiciones de cálculo	87
III.4.1	Características de la vivienda.	87
III.4.2	Condiciones interiores de confort.....	89
III.5	Cálculo del sistema de acumulación	90
III.5.1	Cálculo por sobredimensionamiento del sistema 1.	91
III.5.2	Cálculo por sobredimensionamiento del sistema 2.	93
III.5.3	Cálculo por demanda horaria.....	94
III.6	Potencia del ventilador	98
Capítulo IV: Conclusiones		101
IV.1	Influencia del tamaño de piedra y lecho	103
IV.2	Influencia de las temperaturas	103
IV.3	Trabajos futuros de interés	104
Referencias.....		105
Anexos.....		109
Anexo I: Relación completa de experimentos y resultados.....		111
AI.1.	Resultados de la evolución de temperatura	115
Anexo II: Datos del Año Meteorológico Tipo.		125
All.1.	Datos meteorológicos día 46	129
All.2.	Máximos y mínimos diarios anuales.....	131

Tabla de símbolos y abreviaturas

NOMENCLATURA

E	Energía
W	Trabajo
Q	Calor
\dot{W}	Potencia útil
\dot{Q}	Potencia calorífica
A_i	Área
M_{piedras}	Masa piedras
\dot{m}	Flujo másico
q	Caudal
HR	Humedad relativa
ΔP	Variación de presión
C_p	Calor específico
ρ	Densidad
V	Volumen
H	Altura
D	Diámetro
T	Temperatura
h	Coefficiente de película
h_{fg}	Entalpía cambio de fase del agua
U_m	Coefficiente global de transferencia de calor
e_j	Espesor
k_j	Conductividad térmica
$W_{\text{int/ext}}$	Humedad int/ext
V_{air}	Volumen de la habitación

ε	Eficiencia
C_e	Concentración sustancia contaminante extracción
C_i	Concentración sustancia contaminante impulsión
C_z	Concentración sustancia contaminante zona ocupada
I_{or}	Irradiación solar para una orientación
f_c	Factor de corrección
UTA	Unidad de Tratamiento de Aire

Justificación

Existe cada vez más, un gran interés por mejorar las condiciones de vida de la humanidad, lo cual en la mayoría de los casos, conlleva un aumento en la demanda energética. De hecho, cada vez somos más dependientes de las tecnologías actuales, que en este mundo tan globalizado son absolutamente necesarias. A este aumento de demanda energética hay que sumar la preocupación por el medio ambiente en mantenerlo limpio, seguro y de la mejor forma posible para las futuras generaciones, lo cual, un mal uso de la tecnología o de la energía necesaria para producirla no es compatible con la correcta conservación del mismo. Todo esto, ha llevado a la búsqueda del uso de esta energía de una manera eficiente, tratando de reducir los costes y utilizando sistemas que permitan la reducción de ese uso sin perjudicar el fin para el que esté destinado. El tema que realmente aquí nos concierne, es la necesidad de un confort térmico en interiores, exigido por la normativa vigente, garantizando un ahorro económico a través del uso eficiente de la energía empleada, además, de un ahorro económico en la instalación.

El presente trabajo se centra en la caracterización experimental de un sistema de acumulación de energía, mediante guijarros o "pebble", que pretende suministrar un confort térmico dentro de viviendas que combinan muchas otras técnicas pasivas para conseguir un ahorro de energía. Este sistema se diseña especialmente para climas desérticos donde se puede aprovechar la gran diferencia de temperatura entre el día y la noche para proporcionar energía. A través de ensayos experimentales con sondas de presión y temperatura colocadas estratégicamente a lo largo de la instalación, se han recogido datos, variando ambas variables. En función del tamaño de las piedras, (grande o pequeño) y para diferentes caudales y temperaturas del aire se ha observado el comportamiento de dicha instalación, con el fin de calcular la demanda y la carga energética necesaria para dar confort a una vivienda consiguiendo el mayor ahorro energético.

Al estar aprovechando recursos naturales, tal como, las amplias diferencias de temperatura entre el día y la noche en climas desérticos, no solo conseguimos un ahorro energético y económico en lo que a calefacción o refrigeración en la vivienda se refiere, sino también la reducción de niveles de CO₂, a nivel global, es decir, al reducir el consumo eléctrico, se reduce el CO₂ necesario para producir dicha electricidad, más aún, si el sistema es autosuficiente, es decir, si no requiere ventilador para suministrar la

ventilación de aire caliente/frío a la vivienda y se puede aprovechar el tiro natural.

Este es un paso más que anima a seguir desarrollando sistemas de ahorro energético, ya que la creciente preocupación por el medio ambiente, debido a emisiones de CO₂ que provocan el calentamiento global de nuestro planeta, sigue en aumento, llegando a niveles de gran importancia. Leyes como el protocolo de Kioto, firmado el 11 de Diciembre de 1997 en Kioto, Japón, es un compromiso a nivel mundial entre los países industrializados para estabilizar las emisiones de ¹GEI [W-2, *United Nations, Framework on Climate Change*]. El compromiso que se fijó, trata de reducir niveles de GEI al menos un 5% respecto a 1990 para los años 2008-2012, que fue ampliado hasta 2015. [W-4, *Ministerio de Medio Ambiente, España*].

Por lo que, las leyes establecidas aseguran que la concienciación sobre este problema no decaiga, comprometiendo así los países a que cumplan los requerimientos exigidos, podemos ver el gráfico siguiente la evolución de las emisiones en España.

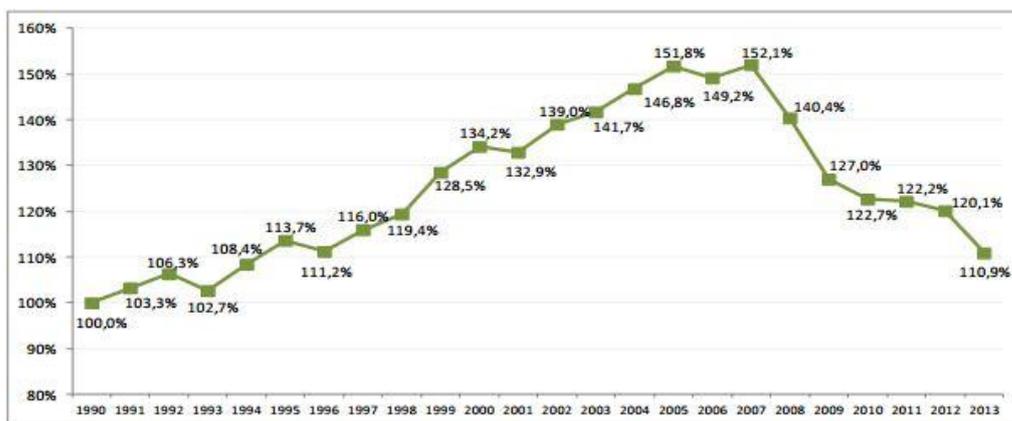


Figura 1. Evolución de las emisiones de GEI tomando como referencia el primer año de la serie (1990).
Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. [W-1]

Se puede apreciar una tendencia a la baja a partir del 2007, pero aún, nos encontramos en 2013 con casi un 11% por encima del valor de referencia de 1990. Estos datos han provocado la cumbre de París, a finales de 2015, para establecer un nuevo protocolo, vinculante, con contribuciones ambiciosas y significativas de los países miembros para iniciar nuevamente en 2020 y luchar para que la temperatura del planeta no supere los 2°C [W-3, *Naciones Unidas para el Desarrollo*].

¹GEI: Gases de efecto invernadero.

Antecedentes

Previamente a la realización de este Trabajo Fin de Grado, el grupo de Termotecnia del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica en la Universidad de Valladolid ha realizado un extenso trabajo sobre el estudio de las prestaciones requeridas en la climatización de espacios, y en particular sobre alternativas de climatización de bajo consumo energético. Dichas alternativas se ha centrado hasta la fecha en sistemas free cooling, enfriamiento evaporativo y recuperación de energía. Algunos de los trabajos precedentes al presente son los mostrados a continuación:

Trabajo de Fin de Grado de Luis Lobo Yagüe titulado *“Estudio y modelado de los parámetros de operación de una torre de enfriamiento para utilizar en una instalación de Free-Cooling por agua”* presentado en el año 2014.

Trabajo de Fin de Carrera de Ángel Cancela Antelo con el título *“Estudio experimental del comportamiento de distintos materiales textiles como medio para enfriamiento evaporativo”* presentado en el año 2015.

Trabajo de Fin de Grado de Eva Miguel Fierro con título *“Caracterización Experimental de un Recuperador Rotativo Sensible”* presentado en el año 2014.

Además de los proyectos anteriores, en los que interviene la refrigeración evaporativa y la recuperación de energía, se han desarrollado dentro del grupo de Termotecnia de la Universidad de Valladolid otros proyectos orientados al estudio de los requerimientos de Calidad de los Ambientes Interiores y de Eficiencia Energética en edificios.

Este Trabajo aquí presente, se convierte en una línea innovadora a la vez que complementaria de los campos mencionados, en los cuales se estudian medios pasivos para pre-acondicionar el aire exterior. Por su parte, en este estudio experimental se trata por primera vez en el grupo de Termotecnia, un sistema de acumulación energético con el mismo fin de todos los trabajos del grupo, establecer un ahorro energético en el interior de una vivienda.

Objetivos

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es, como anticipa el título, la evaluación de un sistema de acumulación energética mediante pebbles, para proporcionar una temperatura de confort en una vivienda, con el consecuente ahorro energético tanto de operación como de instalación, favoreciendo la conservación del medio ambiente y los recursos disponibles, comparando su funcionamiento a partir de diferentes condiciones de trabajo. Dichas condiciones se reproducen mediante una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA), donde se han podido modificar caudales y temperatura sin tener en cuenta la humedad, ya que no afecta al procedimiento.

Con esta idea se analizará la evolución de la temperatura que adquieren las corrientes de aire a su paso por la instalación, en diferentes puntos, analizando el tiempo que tarda cada parte en alcanzar la temperatura de consigna, así como diferentes procesos de convección y conducción que puedan favorecer la transmisión de calor durante la carga. Se analizará la carga del ventilador necesaria para dotar la vivienda de un confort adecuado, calculando la potencia necesaria del mismo para satisfacer esa demanda.

Para evaluar, se realizarán los experimentos sobre dos sistemas diferentes, con el mismo equipo en un conjunto de piedras de tamaño grande ($R=80$ mm aprox.) y un conjunto de piedras de tamaño pequeño ($R=35$ mm aprox.), con el fin de poder extraer los resultados para que sea usado en un sistema real, en la zona de Beni-Abbes, Argelia.

Por lo tanto, el objetivo, aquí es determinar también la viabilidad de usar pebbles para conseguir un almacenamiento de energía que se corresponde con la energía absorbida por la piedra seguida de un descenso de la temperatura. Para ello uno de los aspectos más importantes es el tamaño de la piedra. *"Cuanto más grande es el tamaño de la piedra, más grande es el intercambio aire-piedra y la superficie es menor pero las pérdidas de presión son más grandes, por lo que, es necesario una compensación"* [1, H. Mastouri et al., 2013].

MEMORIA

Capítulo I

Estado del Arte

Este capítulo representa el comienzo del trabajo dando a conocer aquellos aspectos referentes a la calidad de aire interior, confort térmico y normativa aplicable a recintos interiores con el fin de que se obtenga una idea principal y se haga notar la importancia del tema a tratar.

1.1 Calidad del ambiente interior

1.1.1 Introducción

Como consecuencia de los cambios sociales ocurridos durante la segunda mitad del siglo XIX y durante todo el siglo XX, se inició una migración interior en los países, que tuvo como consecuencia el abandono de los modos de vida rurales.

Unos cambios que han provocado que gran parte de la sociedad sea fundamentalmente urbana. Aproximadamente entre el 70% y el 80% de la población vive en núcleos urbanos [6, *World Urbanization Prospects, 2014*] de tamaño medio o grande. Por otra parte, se acepta que el ciudadano medio urbano pasa más del 90% [7, *Indoor air pollution, 2003*] de su tiempo en espacios interiores.

Nadie pone en duda que la sociedad actual está muy concienciada sobre los temas que afectan al medioambiente externo. Sin embargo, existiendo una preocupación creciente en la sociedad actual, poco se ha avanzado en la regulación de las condiciones ambientales en espacios interiores, a pesar de ser un problema que afecta a una mayoría de la población en todo el mundo.

La OMS (Organización Mundial de la Salud) finalmente ha llegado a definir el 'Síndrome del Edificio Enfermo' (SEE) o 'Sick Building Syndrome' (SBS). [2, *Rey et al, 2007*]. Este síndrome se define como un conjunto de molestias (sequedad de piel y mucosas, escozor de ojos, cefalea, astenia, falta de concentración y de rendimiento laboral, entre otras) o enfermedades, que aparecen durante la permanencia en el interior del edificio afectado y desaparecen después de su abandono.

Esta circunstancia ha de darse, al menos, en un 20% de los usuarios [2, *Rey et al, 2007*]. Este síndrome se ha establecido como un valor convenido y aceptado universalmente. Por eso se ha de contemplar con rigor en los planteamientos sindicales o de prevención de riesgos, y se deben establecer y exigir planes de prevención o de corrección eficaz.

1.1.2 Definición de Calidad de Ambiente Interior (IEQ)

La calidad ambiental en edificios es perturbada de forma constante por la interacción de agentes físicos (como la temperatura, el viento, la radiación solar, ruidos, etc.), químicos (tales como sustancias y/o compuestos orgánicos e inorgánicos) y biológicos, produciendo diversos efectos y consecuencias sobre las personas, el medio físico-natural y los edificios. Así

mismo, los elevados índices de contaminación ambiental son una amenaza constante, ya que deteriora el medio ambiente hasta convertirlo en no apto para el desarrollo de ciertas actividades y pone en peligro la vida de las personas y de los seres vivos en general.

El estudio de las posibles soluciones a este problema ha llevado a un nuevo campo de conocimiento denominado Calidad de ambientes Interiores o IEQ (Indoor Environmental Quality).

La norma UNE 171330:2008 [N-3] define como Calidad Ambiental en Interiores a las condiciones ambientales de los espacios interiores, adecuadas al usuario y la actividad, definidas por los niveles de contaminación química, microbiológica y por los valores de los factores físicos. Se excluye del campo de aplicación de esta definición a los recintos destinados a uso industrial y/o agrícola.

De la definición anterior se deduce claramente que edificios con diferente uso de actividades pueden tener diferentes niveles de IEQ.

Al mismo tiempo, la población de ocupantes de un edificio puede variar en su tipo (diferente edad o sexo), densidad de ocupación (alta o baja), estado de salud (sanos o enfermos), predisposición genética y biológica a enfermar (personas hipersensibles, alérgicas o asmáticas). Por esta razón, es imposible definir un único criterio absoluto para satisfacer a la totalidad de los ocupantes en todos los edificios. Luego, los valores de los niveles propuestos han de tomarse con precaución y considerarse como aplicables sólo bajo las condiciones y limitaciones definidas para cada uno de ellos.

De todo lo anterior podemos deducir, que uno de los principales propósitos de los edificios, además de la seguridad estructural, es garantizar la salud y un ambiente confortable para las personas que lo habitan y/o utilizan mediante diferentes actividades.

Además de esto, hay que atenerse al requerimiento de los edificios sostenibles que se refiere a la no emisión excesiva de gases contaminantes o que causen riesgos innecesarios al medio ambiente y para cumplirlo, es completamente imprescindible el uso eficiente de la energía, lo que da lugar, aquí, al uso de energías renovables.

1.1.3 Consecuencias sobre las personas

El significado de la calidad del ambiente interior IEQ para conseguir un elevado grado de salud y confort dentro de los edificios, ha sido desarrollado

recientemente. A causa del elevado tiempo que las personas pasan dentro de espacios interiores(más del 90% como se mencionaba anteriormente), desde el punto de vista de salud, el IEQ es, incluso, más importante que la calidad del aire exterior.

Una buena IEQ reduce el número de enfermedades y los síntomas debidos al síndrome del edificio enfermo SBS. Además, mejora el confort y la productividad. Un buen IEQ es uno de los objetivos más importantes en el diseño, construcción y mantenimiento de los edificios.

El IEQ está afectado por los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, materiales de construcción, operación y mantenimiento del edificio, un buen IEQ requiere considerar estos aspectos durante todas las etapas en lo que a edificio se refiere: diseño, construcción y su uso. Se pueden originar varios problemas de IEQ desde el mismo edificio, causados por la acción de los ocupantes, o también pueden ser debidos a la forma de operación, uso y mantenimiento del mismo.

Para establecer una buena calidad de aire interior hace falta la realización de un estudio en profundidad teniendo en cuenta que, en la mayoría de los casos, los contaminantes sólo podrán ser detectados con equipos específicos. Algunos de ellos son tales como: el gas radón, VOC's (Compuestos Orgánicos Volátiles), gases de combustión diversos, amianto y aislantes peligrosos etc.

En la última década, ha habido un significativo incremento en las inquietudes sociales sobre consultas relativas a la calidad de ambientes interiores en edificios (IEQ). En 1980, las auditorías destinadas a evaluar ambientes interiores de oficina, sólo representaban el 8% del total de auditorías ambientales para investigaciones. Sin embargo, en 1990, el porcentaje se elevaba ya al 38% del total. Desde 1990, las auditorías IEQ han sido el 52% de todas las referidas a estudios medioambientales [*W-5, Centers for Disease Control and Prevention CDC, USA*]. Los investigadores han encontrado problemas de IEQ causados por deficiencias en los sistemas de ventilación, mobiliario y elemento de decoración, gases emitidos por materiales en la oficina y equipo mecánico, humo de tabaco, contaminación microbiológica, y contaminación en el aire exterior.

Otros factores que también se han encontrado son problemas de confort térmico debido a desequilibrios de temperatura y humedad relativa, iluminación baja, inadmisibles niveles de ruido, así como condiciones ergonómicas adversas, y estrés laboral.

Gran cantidad de estos síntomas y problemas se podrían evitar de manera sencilla tomando una serie de medidas adecuadas, bien sea realizando una auditoría IEQ y solucionando los problemas encontrados con ayuda profesional, o bien realizando un buen diseño desde la fase de proyecto. Estos problemas de calidad interior no tendrían lugar ni las repercusiones sobre las personas que de ello puedan derivar.

Por tanto, se puede realizar un estudio IEQ de edificios de la siguiente forma:

- En los edificios ya construidos, el modo de asegurar la calidad del ambiente interior es someter a una auditoría de IEQ. Ésta indicará cuales son los posibles problemas a los que hay que enfrentarse y qué posibles modos de actuación, control y erradicación de los mismos se pueden aplicar.
- En los nuevos edificios, la investigación engloba el diseño y construcción del edificio y sus elementos auxiliares; así como la revisión del producto final, orientados a la obtención del Certificado de Calidad Ambiental Interior.

Es muy importante para la salud y confort de los ocupantes disponer de un lugar con una calidad del aire adecuada, que permita un incremento y mejora de su rendimiento y productividad. Lograrlo, requiere que importantes aspectos del IEQ estén controlados y dentro de unos límites aceptables, lo cual inevitablemente, redundará en un gasto extra de energía y quizás de otros recursos.

El propósito de los proyectos energéticos en edificios, trata de disminuir el consumo de energías sin reducir a su vez los niveles de confort adecuados según las normas de IEQ.

En definitiva, hay que cumplir con los requisitos de rentabilidad económica, sin perjudicar una buena calidad de ambiente interior y una adecuada eficiencia energética que asegure un adecuado ambiente exterior.

1.2 Confort térmico

1.2.1 Introducción

Actualmente, es necesario prestar atención a una de las disciplinas de éxito hoy en día, como es la ergonomía, ciencia referida al estudio de las sensaciones de las personas en diferentes condiciones del entorno y en

aquellos lugares donde se puedan encontrar. No solo son importantes las condiciones climáticas del lugar, si no también tiene en cuenta otros factores, como la percepción de los colores de la habitación, los niveles acústicos o de luminosidad, determinan el grado de aceptación de las personas al medio donde realizan su actividad.

Todo este estudio, no solo permite establecer un confort adecuado para cada individuo si no que da la posibilidad de averiguar las circunstancias más acordes para que pueda desempeñar su actividad correctamente y mejore su rendimiento, dando lugar a una mejor productividad y un beneficio de ambas partes. No se realiza la misma productividad ni de la misma calidad en un ambiente ruidoso, y frío que en otro silencioso y con una temperatura adecuada de confort.

1.2.2 Diseño de las instalaciones

Como bien hemos dicho anteriormente, es necesario proporcionar un confort térmico para la estancia en dicho local, o la realización de cualquier actividad. Para ello se diseñan instalaciones de calefacción, aire acondicionado o ventilación, atendiendo a las necesidades físicas, fisiológicas y psicológicas del ser humano.

Para ello, un sistema de climatización no solo debe tratar de proporcionar un aire a determinada temperatura para acondicionar el local según los requerimientos de la temperatura exterior o de cualquier otro factor ambiente, sino que debe manejar las diferentes variables que afectan al confort como son la humedad, velocidad del aire, temperatura, ruido o pureza del mismo.

De estas variables son solo las tres primeras aquellas relacionadas con el confort térmico, siendo el resto variables que afectan a las necesidades fisiológicas, psicológicas y físicas del ser humano que también han de ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar la instalación. Aunque no sean un parámetro directo a controlar por el sistema de acondicionamiento, ya que no es posible, están relacionadas con el diseño de la instalación.

Para el tratamiento del ruido, hay que poner especial atención a la hora de elegir un buen emplazamiento para dicha instalación y los componentes de la misma, teniendo en cuenta que uno de los principales focos de ruido en un edificio se corresponde al uso de ventiladores sobre todo, además de compresores, bombas etc.,

El otro factor importante al que hacemos referencia, es la pureza del aire, para la cual es necesario un buen equipo de filtración de aire, así como

favorecer una buena renovación de aire dentro del local, y dicha renovación es controlada por el sistema de ventilación.

1.2.3 Parámetros de calidad ambiental

En una instalación de climatización, no se puede satisfacer al 100% de sus ocupantes, existe un parámetro que se asocia a esa parte de los ocupantes insatisfechos llamado Porcentaje de Personas Insatisfechas o PPI, que nunca podrá ser superior al 5%. Algunas instalaciones solo son diseñadas para controlar algunos, pero no todos los parámetros que incluye el confort térmico. Por lo que, en estos casos el PPI puede dispararse por encima del 30%. [2, Rey et al, 2007]

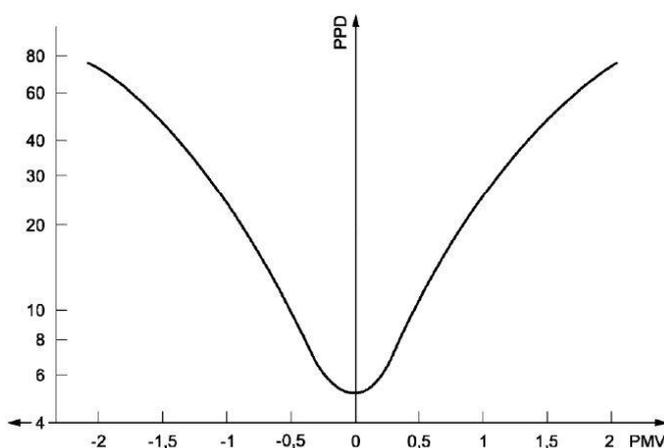


Figura I.1 Diagrama PPI. [2, Rey et al, 2007]

Las condiciones que afectan a la calidad del ambiente deben estar realizadas en la zona ocupada teniendo en cuenta la posición habitual de las personas en ese lugar. Deben de ser fijadas durante el diseño del edificio para determinar los índices de confort térmico. Luego, es necesario conocer cuáles son los parámetros que regulan los intercambios térmicos entre el cuerpo humano y el ambiente y que afectan a dicho confort, antes de plantear el balance energético que son los siguientes [3, Rey, Velasco, 2006]:

a) Parámetros del ambiente

- Temperatura seca del aire.
- Presión parcial del vapor de agua.
- Velocidad del aire en la zona ocupada.
- Temperatura radiante media de los cerramientos.

b) Parámetros del cuerpo humano

- Calor generado; diferencia entre la actividad metabólica (M) y el trabajo generado (W).
- Temperatura y superficie de la piel
- Humedad de la piel debida a la difusión e agua desde los tejidos interiores.
- Porcentaje de superficie de piel mojada por el sudor.

c) Parámetros de la vestimenta

- Resistencia térmica.
- Resistencia al paso del vapor de agua.
- Temperatura superficial.
- Factor de aumento de la superficie del cuerpo desnudo.
- Emisividad de la superficie exterior

1.2.4 Sensaciones térmicas

En numerosas ocasiones la temperatura del aire que nos rodea es la misma, pero unas veces sentimos más calor y otras más frío, o en términos adecuados, menos calor. Como bien hemos dicho anteriormente, no solo la temperatura influye en esas sensaciones sino diferentes variables como son la humedad y velocidad del aire etc.,. Factores a tener en cuenta para garantizar un bienestar térmico adecuado, siendo este, "la condición de la mente" que expresa satisfacción con el ambiente térmico en el que se encuentra. Podemos tratar el cuerpo humano como una máquina térmica de combustión donde obtiene energía de los alimentos para realizar un proceso de combustión de liberación lenta, con el fin de desarrollar trabajo y por ende, disipa calor. Debido al proceso lento de combustión, es capaz de mantener una temperatura corporal constante de aprox. 36,5°.

Esta similitud permite establecer un balance energético que se puede realizar sobre el cuerpo humano donde a través la siguiente ecuación:

$$E_{consumida} = W + Q \quad (\text{E- I.1})$$

El rendimiento de la máquina se obtiene mediante la relación entre trabajo y energía, que al tratarse del cuerpo humano dicha relación es muy pequeña, luego casi toda esa energía se disipa como calor. Del balance energético se deduce, que existirá neutralidad térmica cuando la energía utilizada para producir trabajo y la disipada en forma de calor coincidan, la energía interna del cuerpo permanece constante, o lo que es lo mismo, la variación de

energía interna es nula, en otro caso, existirá sensación de calor o de frío, es decir:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} \begin{array}{l} >0: \text{ Sensación de calor} \\ =0: \text{ Neutralidad térmica} \\ <0: \text{ Sensación de frío} \end{array} \quad (\text{E- 1.2})$$

La variación de energía interna en el cuerpo humano tiene una serie de efectos sobre este dependiendo de si dicha variación es positiva o negativa. Si existe un aumento del contenido energético (sensación de calor) se producen vasodilataciones, se incrementan las pulsaciones (aumento de la velocidad de la sangre) y aumenta la sudoración (disipación de calor latente, un mecanismo para liberar calor a través de la piel). Por el contrario, si existe una disminución del contenido energético o sensación de frío se produce la vasoconstricción, menores pulsaciones, la contracción de músculos y piel y la aparición de escalofríos para generar calor.

El confort se puede establecer en función de diferentes variables como se muestra a continuación:

$$\text{Confort} = f(\text{MET}, \text{CLO}, V_{\text{aire}}, T_{\text{seca}}, \%HR, \bar{T}_{\text{radiante}}) \quad (\text{E- 1.3})$$

Siendo:	<i>MET</i>	Índice del metabolismo
	<i>CLO</i>	Índice de vestimenta
	<i>V_{aire}</i>	Velocidad del aire
	<i>T_{seca}</i>	Temperatura seca del aire
	<i>%HR</i>	Humedad relativa
	<i>T̄_{radiante}</i>	Temperatura media radiante

1.3 Ventilación

1.3.1 Introducción

Ventilar es *renovar y extraer el aire interior de un recinto y sustituirlo por aire nuevo del exterior a fin de evitar su enrarecimiento, eliminando el calor, el polvo, el vapor, los olores y cuanto elemento perjudicial o impurezas contenga el aire ambiental encerrado dentro del local [2, Rey, Velasco, 2007].*

De no llevarse a cabo esta renovación del aire interior, la respiración de los seres vivos que ocupan el local sería dificultosa y molesta, siendo un obstáculo para desarrollar la actividad para la que está destinado el local. Por tanto una correcta ventilación es muy importante en todo lo referente a instalaciones de acondicionamiento de aire.

Incluso el movimiento de aire que da lugar en la ventilación puede causar sensaciones placenteras de frescor cuando las condiciones ambientales son calurosas, por otra parte, pueden aumentar el riesgo a tener unas condiciones frías, poniendo en riesgo la salud de los ocupantes. Para ello existen diferentes técnicas que regulan dicha ventilación de manera mecánica y natural.

1.3.2 Caracterización de la ventilación

Existen determinadas variables que caracterizan la ventilación como son:

- Las renovaciones o cambios de aire.
- El caudal de aire.
- La edad de aire
- La eficacia de la ventilación.

1.3.2.1 Renovaciones del aire

La cantidad de aire necesaria para efectuar una ventilación adecuada del local puede depender de muchos factores, entre los cuales se encuentran;

- Dimensiones y características del local
- Actividad a que está destinado.
- Calor a disipar o carga térmica.

La renovación de aire de un local es entonces, la cantidad de aire necesaria para renovar por completo el aire ocupado en el volumen de dicho local.

Normalmente en todos los casos cuando se utiliza el concepto de las necesidades de ventilación de un local se hace referencia al número de renovaciones/hora. Para un local deben ser al menos 1 por hora.

El aire exterior mínimo de ventilación introducido en los locales se empleará para mantener estos en sobrepresión con respecto a:

- a) Locales de servicio o similares, supone una corriente de aire desde los primeros a los segundos que evite la intrusión de olores en espacios habitualmente ocupados por personas.
- b) El exterior, para evitar infiltraciones que den lugar a la entrada de polvo y corrientes de aire incontroladas.

Por tanto, la ventilación mecánica se usará para todo tipo de sistemas de climatización, siendo el aire exterior filtrado y tratado térmicamente antes de introducirse en el interior de los locales. El análisis de las características físicas del aire alrededor del edificio definirá los tratamientos a los que ha de someterse antes de pasar al interior del local.

Su grado de contaminación afectará a la selección del sistema de filtrado a emplear. La posible existencia de diversas calidades de aire, tanto térmicas como contaminantes, en el entorno del edificio hace necesaria la correcta ubicación de las tomas de aire exterior, teniendo en cuenta los vientos dominantes y las zonas de aire con calidad diferenciada por insolación o contaminación. Se deberá buscar la zona en la que el aire posea unas características más propicias según las necesidades en cada caso del aire que se desee impulsar al local.

1.3.2.2 Caudal de aire

Es otra de las variables que se utilizan para la caracterización de la ventilación. Para este caso se define el caudal como el producto de la velocidad media del aire dentro del conducto por la sección de paso del mismo.

Es importante definir esta variable para poder seleccionar un sistema de ventilación adecuado a las características de su uso.

1.3.2.3 Edad del aire

La edad del aire dentro de un local se refiere al tiempo que se ha mantenido este en dicho local. El aire «más joven» se encuentra en el lugar por donde el aire exterior entra en el recinto. Existen dos maneras de tener en cuenta la edad del aire:

1. Edad del aire media local, en caso de ser valorada la ventilación para puestos de trabajo de manera individual.

2. Edad del aire media recinto, siendo está un número que cuantifica el rendimiento del sistema de ventilación, dicho numero tiene en consideración la cantidad de aire de ventilación suministrado al recinto y la eficacia con la se reparte dentro de ella. Es medida en el conducto de extracción y se realiza mediante gases trazadores.

1.3.2.4 Efectividad de la ventilación

La calidad del aire puede ser diferente en distintas partes de un recinto ventilado, sin embargo, lo que realmente importa para los ocupantes es la calidad del aire en la zona ocupada. La eficiencia de la ventilación, junto con la eficacia de la temperatura, es una de las principales características del sistema de distribución de aire en un recinto y tiene un impacto importante sobre las necesidades de ventilación.

La efectividad de la ventilación dependerá de la distribución del aire y de la localización de las fuentes de contaminación en el espacio. Por ello, puede tener diferentes valores para diferentes contaminantes.

La eficacia de ventilación depende de los siguientes factores:

1. Del sistema de difusión de aire empleado.
2. De la localización de las fuentes de contaminación.
3. De la situación y características de las unidades de impulsión y retorno de aire.
4. De la diferencia de temperatura entre aire impulsado y aire del ambiente.
5. Del caudal de aire impulsado

Dicha eficacia queda definida a través de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e/C_i - 1}{C_z/C_i - 1} \quad (\text{E- 1.4})$$

Siendo:

- C_e la concentración de sustancia contaminante en aire de extracción.
- C_i la concentración de sustancia contaminante en aire de impulsión.
- C_z la concentración de sustancia contaminante en zona ocupada.

Se pueden distinguir dos tipos de ventilación

- a) Ventilación por mezcla: Para este tipo de ventilación, la zona de impulsión esta generalmente por encima de la zona ocupada, Las mejores condiciones se alcanzan cuando la mezcla es tan perfecta que las dos zonas se transforman en una. La eficacia puede llegar a alcanzar la unidad.
- b) Ventilación por desplazamiento: En este otro tipo, existe una zona de impulsión de aire, corresponde a la zona ocupada por los ocupantes, y una zona de extracción encima de la de impulsión. Las mejores condiciones se dan al existir una mínima mezcla entre la zona de impulsión y la de extracción. Puede en teoría alcanzar en eficacia, un valor infinito.

1.3.3 Sistemas de ventilación

Los sistemas de climatización, y por consiguiente el subsistema de ventilación de los mismos, pueden clasificarse siguiendo distintos criterios. Un primer criterio consiste en clasificar estos sistemas en individuales y colectivos. Este es el criterio que establece la reglamentación vigente en España. Por otro lado, podemos clasificar dichos sistemas por la forma en la que se lleva a cabo la ventilación, esto es por extracción, impulsión o bien extracción e impulsión reunidas en una misma instalación.

Otro criterio de clasificación puede hacerse atendiendo a si el medio que facilita la ventilación es espontáneo por la acción combinada del viento y como consecuencia de la diferencia de temperaturas, o si bien es un medio mecánico. Se habla entonces de ventilación natural o mecánica. También se pueden clasificar los sistemas de climatización según el caudal de aire que emplean, ya sea este constante o variable.

Dependiendo de la naturaleza del local a ventilar el uso de unos sistemas u otros será más recomendable. Por otro lado se debe tener en cuenta las implicaciones energéticas de las distintas formas de ventilar.

El método más utilizado es el de extracción de aire, se dispone de unos ventiladores en modo de extracción, en distintos sitios que aseguren el barrido por el aire exterior del local. Los ventiladores aspiran el aire interior con la carga contaminante y lo expulsa al exterior. Para que existan estas corrientes de circulación de aire es necesario que haya huecos por los que pueda entrar el aire del exterior limpio [4, *Carnicer, 1994*].

Existen diferentes configuraciones de flujo en función de dónde se encuentre el acceso de aire exterior y el ventilador de extracción (*Figura 1.2*).

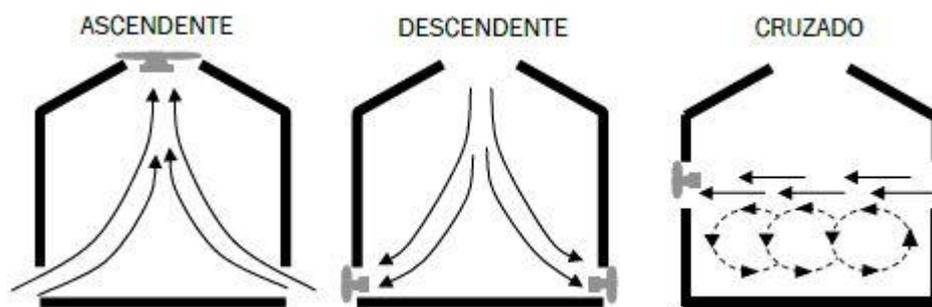


Figura I.2 -Sistema de extracción de aire. [2, Rey et al., 2006]

En el método por impulsión de aire, los ventiladores impulsan el aire exterior hacia el interior del recinto, creando una sobrepresión dentro del local que obliga a la salida del aire viciado por las aberturas, rendijas, rejillas específicas, etc. Este sistema impide que penetre aire del exterior incontrolado, pudiendo, por ejemplo, tratar el aire por filtración evitando la entrada de partículas o tratarlo higrotérmicamente. Este sistema permite controlar el flujo y la distribución del aire en diferentes locales según la demanda de los mismos. En la figura I.3 se muestra esta configuración.

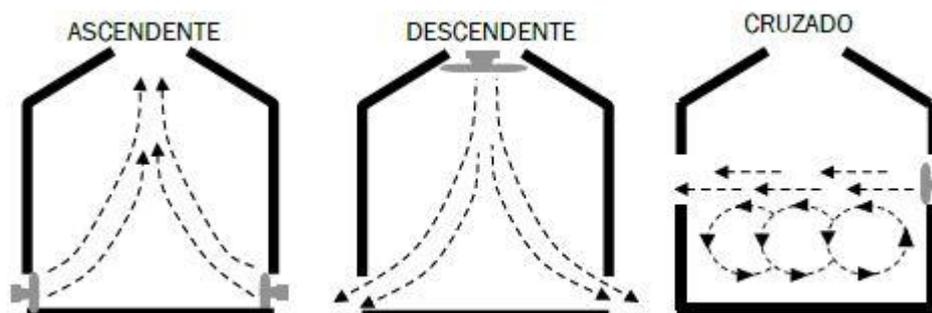


Figura I.3-Sistema de impulsión de aire. [2, Rey et al., 2006]

El último sistema es el de extracción-impulsión, que combina las dos técnicas anteriores, permitiendo así realizar un estudio de las zonas de impulsión y retornos del aire, según la geometría del local, asegurando una distribución adecuada del aire limpio y una eficacia alta de ventilación. Se usan ventiladores para impulsar el aire limpio y para extraer el aire viciado. Habrá zonas en depresión próximas a los extractores de aire y otras en sobrepresión próximas a los ventiladores en configuración como impulsores. Dos esquemas de las líneas de flujo que puede aparecer en este sistema se presentan en la figura I.4.

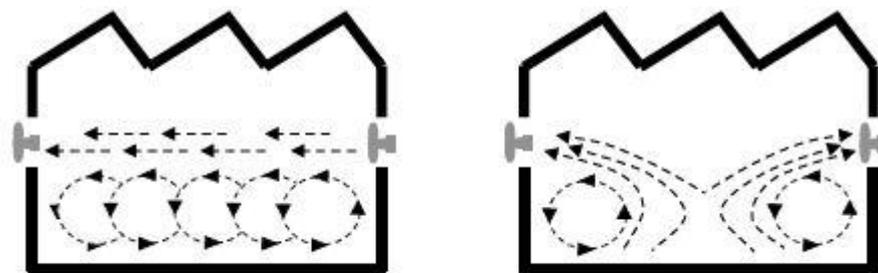


Figura I.4-Sistema de impulsión de aire. [2, Rey et al., 2006]

Como hemos dicho anteriormente las técnicas de regulación son la ventilación natural y mecánica, a continuación se analizan ambos sistemas.

Ventilación natural

La ventilación natural tiene lugar cuando la renovación de aire en un local se efectúa aprovechando las características naturales del aire, lo que hace que la renovación de aire varíe según la velocidad del viento y diferencia de temperatura. También forman parte de la ventilación natural las infiltraciones y exfiltraciones de aire a través de las paredes de los edificios. Se pueden establecer como factores básicos de la ventilación natural los siguientes.

- Diferencia de altura.
- Diferencia de temperatura exterior e interior.
- Diferencia de presión.
- Acción del viento
- Carga térmica

No obstante, cada uno de los factores anteriores se comportan individualmente dando lugar a efectos diversos, como por ejemplo, la acción del viento sobre las paredes de un edificio originará zonas de sobrepresión en un lado y zonas de depresión en el otro lado y los laterales.

Otro posible efecto, ocasionado por diferencias de temperatura entre el interior y exterior del local es el llamado efecto chimenea que a consecuencia de la diferencia térmica de dos masas de aire en contacto, provoca que el aire de menor temperatura del exterior se introduzca hacia el interior por los niveles inferiores, desplazando el de mayor temperatura, hacia niveles superiores donde se escapará al exterior.

Ventilación mecánica

Cuando la ventilación natural no tiene cabida, o no es suficiente, se usa la ventilación mecánica, por medio de ventiladores y/o extractores que dan lugar a la renovación del aire interior en un local determinado. Se puede realizar de manera individual o a través de una red de conductos para una instalación de manera colectiva. Se pueden distinguir tres tipos de ventilación mecánica [2, Rey, Velasco, 2007]:

- **La ventilación mecánica controlada**, mediante extracción del aire. Presenta una gran estabilidad de caudal a través de las bocas de entrada y de salida del aire. El local se encuentra en depresión y el caudal se regula a través de un sistema de compuertas.
- **La ventilación mecánica regulada higrométricamente**. Los caudales extraídos varían con la humedad relativa, siendo el sistema de aire exterior el único encargado de controlar la humedad relativa del aire en el interior. Este sistema, si la humedad relativa es adecuada, permite reducir los caudales de ventilación, reduciendo así las pérdidas energéticas por renovaciones de aire.
- **La ventilación mecánica controlada de doble flujo**. Es la técnica que mejor reduce las pérdidas energéticas por ventilación en las viviendas, pero presenta un alto coste de instalación al necesitar dos ventiladores (impulsión y extracción). La reducción de las pérdidas es debida al uso de un recuperador de calor.

1.3.4 Sistemas de climatización todo aire

Los sistemas de ventilación analizados en el apartado anterior forman parte de una instalación más general de climatización. Cuando se analiza el caudal de aire que circula por la instalación, parámetro utilizado para analizar la ventilación, se clasifica atendiendo si es caudal constante o variable.

1. Caudal constante (VAC): Se utiliza en instalaciones de climatización de locales que posean una carga térmica prácticamente constante. El sistema de caudal constante, utilizando un control de temperatura variable del aire, permite que todo el caudal de aire sea enfriado o calentado en un climatizador, que sea capaz de satisfacer las exigencias de la zona cuya carga térmica de refrigeración o calefacción sea máxima.

2. Caudal Variable (VAV): Este sistema regula las condiciones térmicas del local modificando el volumen de aire frío que se introduce, manteniendo su temperatura constante. Cuando la carga térmica disminuye, el aire impulsado entra a la misma temperatura, pero con un caudal menor. La regulación del caudal se realiza utilizando compuertas reguladas automáticamente en función de la temperatura de consigna del local, controlada a partir de un termóstato

1.3.5 Normativa de ventilación

1.3.5.1 La norma Americana: ASHRAE 62-2004

Este estándar de ventilación y de aplicación en los Estados Unidos fue aprobado en 2004 por el comité de ASHRAE [N-5], y su denominación genérica es Ventilación para una Calidad del Aire Interior Aceptable (Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality).

La calidad del aire interior es una función que depende de muchos parámetros incluyendo la calidad del aire exterior, el diseño de los espacios interiores, el diseño de los sistemas de ventilación, la manera en la que maneja el sistema y como se mantiene etc. Este estándar trata del diseño del sistema de ventilación y su interrelación con todos estos parámetros para asegurar una buena calidad del aire interior.

1.3.5.2 La norma Europea: CEN 1752

Esta es la norma Europea en materia de ventilación, conocida como CEN 1752 [N-6]. En ella se tratan los criterios para conseguir un ambiente interior de calidad a través de los sistemas de ventilación.

La CEN 1752 se basa en dos métodos de análisis un *procedimiento sensorial* o método de Fanger, que analizará el confort de las personas, y *otro de dilución o sanitario*, para conseguir una buena calidad del aire desde el punto de vista sanitario.

Un criterio a seguir puede ser calcular los correspondientes caudales de ventilación para ambos métodos, y seleccionar el que sea mayor.

1.3.5.3 El Código Técnico de Edificación: CTE -HS3

El 17 de marzo de 2006 se aprobó el Código Técnico de la Edificación CTE, una normativa que contempla la seguridad, habitabilidad y sostenibilidad de las edificaciones españolas. Las exigencias básicas de la normativa se estructuran en diferentes documentos básicos (DB).

Existe un DB sobre salubridad HS, formado por diferentes documentos, siendo el HS 3 el correspondiente a la Calidad del Aire Interior. Este documento se aplica, en los edificios de viviendas, al interior de las mismas, los almacenes de residuos, los trasteros, los aparcamientos y garajes.

Para locales de otros tipos la demostración de la conformidad con las exigencias básicas debe verificarse mediante un tratamiento específico adoptando criterios análogos a las condiciones establecidas en esta sección.

Tabla I.1 Caudales de ventilación mínimos exigidos qv en l/s

Tipo de local	Por persona	Por m ²	Por local
Dormitorios	5	-	-
Salas de estar y comedores	3	-	-
Aseos y cuartos de baño	-	-	15
Cocinas	-	2	50
Trasteros	-	0.7	-
Garajes	-	-	120 por plaza
Almacenes de residuos	-	10	-

Las viviendas deben disponer de un sistema general de ventilación que puede ser híbrida (si las condiciones de presión y temperatura ambientales son favorables por ventilación natural, y si son desfavorables, como en la ventilación con extracción mecánica) o mecánica, siguiendo las condiciones generales de diseño que se establecen en el apartado 3 de HS [N-1, *Oficina de vivienda, CTE, 2008*].

1.3.5.4 Reglamento Español de Instalaciones Técnicas en Edificios (RITE)

El RITE es la norma de obligado cumplimiento en España a la hora de garantizar un confort ambiental en locales climatizados. Estas recomendaciones aparecen en las instrucciones técnicas de dicho reglamento.

El RITE confirma que para el mantenimiento de una aceptable calidad de ambientes interiores se considerarán los criterios de ventilación de la norma *UNE 100-011, [N-4]* en función del tipo de local y presencia de contaminantes.

Además, indica que la ventilación mecánica se adoptará para todo tipo de sistemas de climatización siendo recomendable también para los demás

sistemas a implantar en locales atemperados térmicamente, siendo el aire exterior siempre filtrado y tratado térmicamente antes de su introducción en los locales.

El RITE, establece que siempre que sea posible se debe de favorecer el ahorro de energía en los caudales de aire exterior, utilizando por ejemplo tomas de aire que sean regulables, para acondicionar el caudal de ventilación en las condiciones del ambiente exterior. El RITE, en su versión de 31 de julio de 2006, presenta unas Instrucciones Técnicas IT. La IT 1 se ocupa del diseño y dimensionado, en cuya estructura se encuentra la IT1.1 referida a la exigencia de bienestar e higiene. Dentro se encuentra la IT 1.1.4 dedicada a caracterización y cuantificación de la exigencia de bienestar e higiene, siendo específicamente la que hace referencia a la calidad del aire interior la IT 1.1.4.2, cuyo título específico es: “Exigencia de calidad del aire interior” [N-2].

I.4 Sistema de almacenamiento de energía

En los anteriores apartados, se han explicado conceptos relacionados con el tratamiento de aire, finalidad del acondicionamiento de aire, y la normativa para un uso correcto y acorde a las necesidades de las personas.

En este apartado se procederá a explicar el tema de estudio de este trabajo de una manera más detallada así como su funcionalidad, utilidad y elementos necesarios para ponerlo en marcha en una instalación. Como bien dice el título, el tema de estudio es un sistema de almacenamiento de energía para acondicionamiento de aire en una instalación de refrigeración, ya que, estos sistemas son uno de los métodos pasivos eficientes para reducir el uso de la potencia eléctrica en sistemas de acondicionamiento de aire [1, Mastouri H., 2013].

Un sistema de almacenamiento de energía, toma o cede calor a un medio de almacenamiento para usarlo en otra aplicación. Estos sistemas pueden implicar un almacenamiento a diferentes temperaturas asociado a sistemas de calefacción o frío, consiguiendo un confort térmico adecuado en aquellos lugares donde va a ser usado. La energía puede ser cargada, almacenada y descargada diariamente, semanalmente, anualmente o por estaciones, también mediante ciclos de proceso rápido. Este confort térmico, combinado con un ahorro del consumo energético es la razón por la cual, estos sistemas pueden resultar atractivos en cuanto a cargas de calefacción o frío si se cumple una o más de las condiciones siguientes [5, Ahuja A., 1997].

- Cargas de pequeña duración
- Cargas ocurren con poca frecuencia

- Cargas cíclicas por naturaleza
- Las cargas no se corresponden con la disponibilidad de la fuente de energía
- Los costes de energía son dependientes del tiempo, por ejemplo, tasa de tiempo de uso de energía o cargos de demanda por el consumo de picos de energía.
- Rebajas para servicios públicos, créditos fiscales u otros incentivos económicos son proporcionada por el uso de equipo de carga-desplazamiento.

Una amplia variedad de materiales pueden ser usados como medio de almacenamiento. Es aconsejable que cumplan ciertas características sencillas como las que se muestran a continuación:

- Que estén ampliamente disponibles
- Bajo coste
- Limpios, en cuanto a conservación de medio ambiente se refiere.
- No sean inflamables, ni explosivos.
- No corrosivos ni tóxicos.
- Inertes.
- Propiedades físicas definidas.
- Alta densidad
- Alto calor específico para calor de almacenamiento sensible.
- Alto punto de fusión para calor de almacenamiento latente.
- Altas características de transferencia de calor.
- Almacenamiento a presión ambiente.
- Sin cambio en sus características para largos tiempos de uso.

Todo ello es necesario para lograr un ahorro económico tanto en el uso de la energía eléctrica como en el costo de la instalación. Anteriormente se ha definido este sistema como uno de los métodos eficientes para reducir las necesidades de energía eléctrica.

Cabe mencionar, que el uso de estos sistemas es adecuado únicamente en lugares donde la diferencia de temperatura entre una estación u otra, o como en nuestro caso de estudio, entre el día y la noche sea grande, ya que de esta forma es posible un almacenamiento de energía suficiente para llegar a producir ese ahorro energético de una manera eficiente dependiendo el mayor tiempo posible de estas técnicas pasivas totalmente limpias y dejando de lado la dependencia energética.

1.5 Cargas térmicas

1.5.1 Introducción

Antes de dar una definición sobre el concepto de carga térmica es necesario tener en cuenta una serie de conceptos para realizar los diferentes cálculos en edificios, locales etc. Son los que se muestran a continuación:

- Demanda energética: Cantidad de energía que hay que aportar para mantener las condiciones interiores. Depende de las condiciones del interior, de las variables climáticas, ocupación, etc. Calcula los mínimos exigidos que tiene que cumplir de carga térmica.
- Consumo energético: Energía consumida para abastecer la demanda existente. Se suele medir a lo largo de un periodo de tiempo y depende del tipo de instalación utilizada y del rendimiento.
- Emisiones: Impacto medioambiental, normalmente medido con emisiones de CO₂ derivado del consumo energético.

Se define carga térmica como la potencia energética máxima demandada que hay que aportar para mantener las condiciones de los locales, el edificio etc. La carga térmica es utilizada para el dimensionado de las instalaciones, como los sistemas de producción de energía (calor o frío), redes de distribución, emisores energéticos (radiadores, difusores de aire, fancoils, etc.)

Se dimensiona sobre todo para las cargas de calefacción y de refrigeración. Se entiende por **cargas de calefacción**, la potencia de calentamiento máxima en condiciones más desfavorables de invierno necesaria para cerrar el balance de las pérdidas a través de los cerramientos y la ventilación, no teniéndose en cuenta las ganancias internas, que reducen las necesidades de calefacción.

Mientras que las **cargas de refrigeración**, es la potencia de enfriamiento máxima en condiciones más desfavorables de verano, necesaria para vencer todas las ganancias de calor existentes en el edificio, local, etc.

A las condiciones más desfavorables en las que se debe calcular dicha carga térmica se las denomina condiciones de diseño.

1.5.2 Cálculo de cargas térmicas

Como se ha dicho anteriormente es necesario el cálculo de dichas cargas para mantener las condiciones de confort en el lugar deseado, para ello se ha de conocer la clasificación de cargas que entran en el cálculo y para qué tipo de carga se está realizando dicho cálculo. En el siguiente punto se extiende el concepto de una manera más detallada.

1.5.2.1 Clasificación de cargas térmicas

Las cargas térmicas se deben a distintos fenómenos de intercambio de calor entre el edificio y el exterior, así como a ganancias de calor internas. A continuación se muestran una clasificación de las cargas térmicas:

- Cargas térmicas de transmisión: Es la carga sensible transmitida a través de los cerramientos de un edificio.
- Cargas térmicas de ventilación: Es la debida a la renovación del aire del interior del edificio. Sensible y latente.
- Carga térmica de infiltraciones: Es la debida al aire que entra a través de los intersticios del edificio. Sensible y latente.
- Carga térmica de radiación: Es la carga sensible debida al paso de la radiación solar a través de superficies acristaladas. Sensible.
- Carga térmica interna: Es la debida al uso del edificio, tanto por máquinas y equipos que están en funcionamiento, como por la presencia de las personas que hay en su interior. Sensible y latente.

Como podemos apreciar en la siguiente figura I.1, nos indica una curva de demanda para un ejemplo dado de cálculo en un local, la carga térmica coincidirá con la demanda punta:

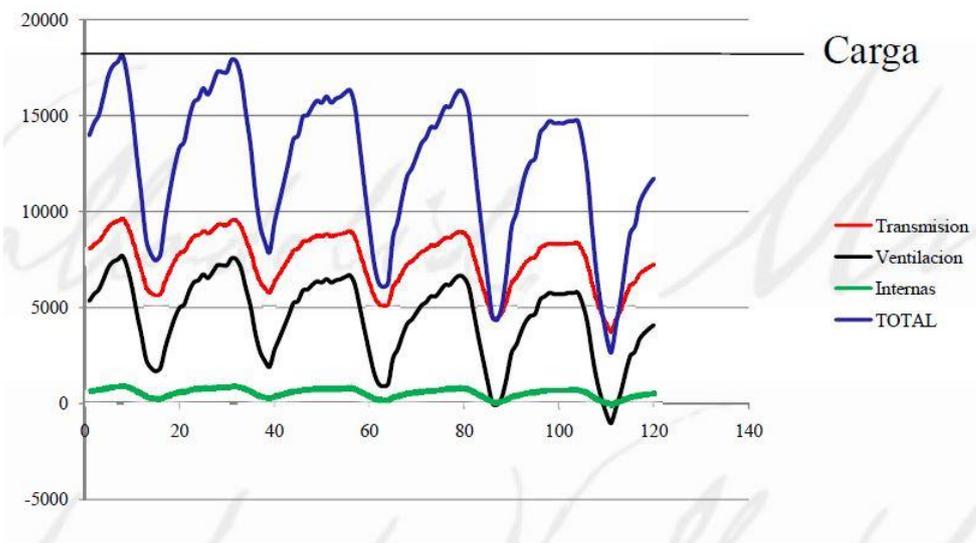


Figura I.5 Curva de demanda para cálculo de carga térmica en un espacio cualquiera utilizado de lunes a viernes.

Capítulo II

Desarrollo Experimental

En este capítulo se va a mostrar la instalación experimental donde se llevaron a cabo los experimentos para la realización de los mismos y la toma de datos, así como una detallada explicación de los elementos necesarios utilizados para la realización del estudio de este trabajo.

Con estos experimentos se pretende mostrar el funcionamiento que tendría realmente en una instalación sobre un emplazamiento real, la cual, estuviera sometida a diferentes cambios de temperatura causados de manera natural por las condiciones del ambiente.

También se detalla la calibración de los elementos de medida para la recogida de datos de las variables que influyen en el experimento.

II.1 Instalación experimental

A continuación se muestran todos los elementos necesarios utilizados en la experimentación que tuvo lugar en el laboratorio de Termotecnia para la realización de la toma de datos del sistema de acumulación de energía. Dichos elementos son los siguientes:

- Unidad de tratamiento de aire (UTA) que proporciona los caudales requeridos a la temperatura y humedad asignados.
- Conjunto de piedras o pebbles, utilizadas como sistema de acumulación. Se utilizan dos tamaños: pequeño y grande.
- Medidores de caudal y de temperatura (sondas) para la medida de temperatura en diferentes lugares de la instalación.
- Elementos de distribución de aire que conectan con el resto de elementos de la instalación y permiten distribuir dicho aire a lo largo de la instalación completa.

II.1.1 Unidad de tratamiento de aire (UTA)

Este equipo es necesario para proporcionar a la instalación experimental el suministro de aire necesario para realizar la simulación. Este equipo permite la variación tanto del caudal como la temperatura y humedad para ajustarlo según convenga para cada aplicación requerida durante la toma de datos.

Para poder analizar adecuadamente las combinaciones de las configuraciones posibles según las condiciones del aire exterior, se ha equipado el sistema con un plenum de distribución que permite tener dos corrientes de aire independientes en las mismas condiciones. Esta implementación permite analizar configuraciones donde intervenga free cooling por aire, o simular varios equipos operando a la vez.

También se ha instalado un humidificador con control que permite simular diferentes condiciones en cuanto a los contenidos en humedad del aire, aunque para este experimento no influye la humedad. Estos elementos se pueden observar en la figura II.1:

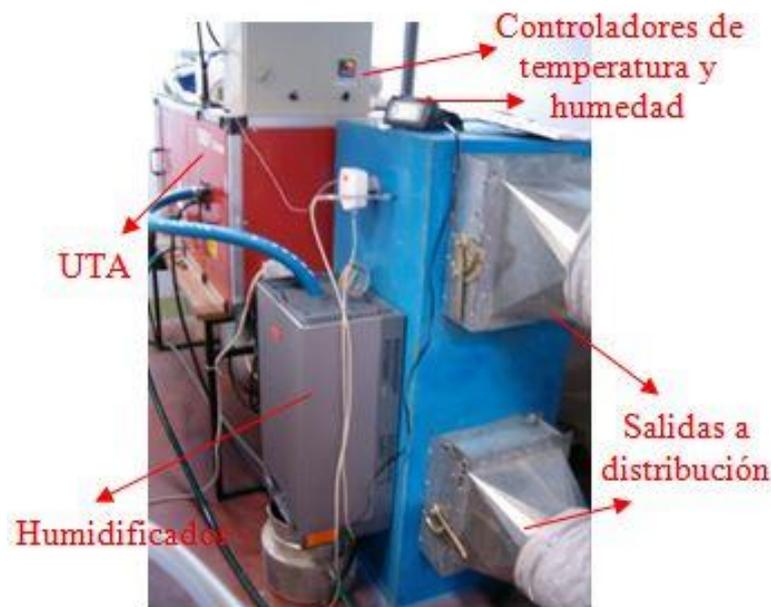


Figura II.1 UTA equipada con control de temperatura, humidificación y plenum de distribución.

II.1.2 Sistema de acumulación utilizado

Como se ha expuesto a lo largo del presente trabajo, el sistema de almacenamiento de energía utilizado para la instalación sobre la que se realizarán los posteriores experimentos, consta de un conjunto lleno de piedras o pebbles, incluidos dentro de un tubo cilíndrico de PVC dispuesto de manera horizontal y retenido, a ambos lados mediante retenes de alambre para evitar el movimiento de las piedras o el escape de alguna de ellas al entrar en contacto con el aire (ver Figura II.2)

Se dispone de dos tamaños diferentes para realizar los experimentos teniendo en cuenta ambos, uno pequeño y otro grande, siendo más grande el intercambio aire-piedra con el segundo que con el primero, pero así mismo las pérdidas de presión serán mayores, por lo que es necesario que exista una compensación.

La masa de las piedras disponible en el experimento es de 36 Kg. Debido a que la densidad de ambas piedras es la misma, al ser de idéntico material, el peso de ambas, también será exactamente igual, ya que el volumen es el mismo, pues únicamente variará el número de las mismas.



Figura II.2 Sistema de piedras en tubo PVC

II.1.3 Medición de caudal

A continuación se muestra la diferente instrumentación utilizada para el control del ajuste de los caudales utilizados en la toma de datos.

II.1.3.1 Placas orificio

Para poder medir los caudales de aire impulsado y retornado de la instalación, se ha realizado la calibración de los manómetros de presión diferencial utilizados para medir la pérdida de carga en una serie de placas orificio dónde se instalan estos manómetros de presión diferencial.

Estas placas orificio que han sido fabricadas en el laboratorio, se calibran empleando una tobera abierta de la casa TECNER TG-50 donde se mide el caudal. De esta manera se relacionan los caudales de aire que circulan por las placas de orificio y la pérdida de carga que experimenta el aire. En las siguientes figuras se muestran los elementos utilizados en la calibración y medida de caudal de aire.

El funcionamiento de la placa orificio es sencillo. Estas placas disponen de una reducción de la sección de paso. Por la ecuación de conservación de la masa (E- II.1), una reducción en la sección de paso produce un aumento de la velocidad, es decir, un incremento en la energía cinética del fluido que da lugar a una disminución de la presión permaneciendo en una proporción constante, según indica, el teorema de Bernoulli (E- II.2), existiendo así, una diferencia de presión entre la sección aguas arriba y aguas abajo de la placa.

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho dV + \iint \rho(\mathbf{v}_r \cdot \vec{n}) dS \quad (\text{E- II.1})$$

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + gz = cte \quad (E- II.2)$$

Se utilizan dos placas orificio intercaladas en los conductos de aire para la medida del caudal volumétrico a través de la diferencia de presión entre la entrada y la salida de cada placa. Dichas placas se sitúan a la entrada del conjunto de piedras y a la salida, esta última para medir el caudal de fuga.

Las tomas de presión se disponen junto a placas orificio de PVC (ver figura II.3) situando una toma a un diámetro de distancia aguas arriba desde la placa orificio y la otra a medio diámetro de distancia aguas abajo (250 mm y 125 mm respectivamente).



Figura II.3 Placa orificio PVC

II.1.3.2 Transductor digital

Un transductor digital (ver figura II.4) es un dispositivo multifunción que permite obtener valores numéricos de las magnitudes de presión diferencial y se utilizó para la toma de datos de la diferencia de presión que tenía lugar en las placas orificio.

Para la conexión del dispositivo se colocaron unos manguitos aguas arriba y aguas abajo de la placa orificio, que conectaban con la correspondiente conexión del transductor (ver figura II.5).

El dispositivo realiza las mediciones de las magnitudes tomando el valor medio de estas en un intervalo de tiempo determinado.



Figura II.4 Transductor digital Testo 435



Figura II.5 Conexión entre manguitos y dispositivo.

II.1.4 Medición de temperatura

Para la medición de la temperatura del aire se utilizaron 9 sondas dispuestas en diferentes lugares a lo largo de la instalación. Se disponen de la siguiente forma (ver figura II.6):

- Tres sondas en el conducto de entrada después de la placa orificio de entrada.
- Tres sondas en el conjunto de piedras, principio (Pos1), mitad (Pos2) y fin (Pos3).
- Tres sondas en el conducto de salida antes de la placa orificio de salida.

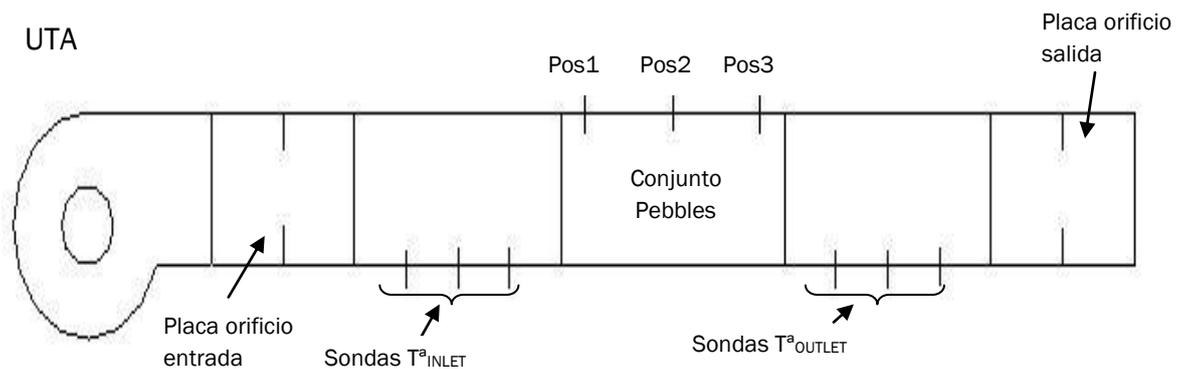


Figura II.6 Disposición de las sondas de temperatura en la instalación

Para llevar a cabo estas medidas, por tanto, se emplearon termo-resistencias Pt100, tanto de tipo cerámico (Figura II.7a) como de película fina (Figura II.7b). Dichos sensores fueron conectados al equipo de adquisición de datos mediante conexión a 4 hilos.

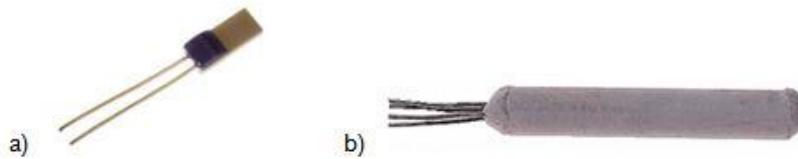


Figura II.7 *Sondas de temperatura Pt100 empleadas en la instalación: a) de película fina (thin-film), y b) de tipo cerámico.*

Las sondas de tipo cerámico demostraron mayor precisión y un comportamiento más estable.

Durante la instalación se usaron indistintamente ambas sondas Pt100 tanto de película fina como de tipo cerámico. En el conjunto de piedras se utilizaron tres sondas con el fin de medir distinta temperatura en cada parte del tubo cilíndrico donde fueron colocadas, a diferencia de la colocación de estas tanto en la entrada como en la salida, para lo cual, se utilizaron tres sondas Pt100 para asegurar la medida de la temperatura en caso de fallo de alguna de ellas. En el caso de que no hubiese desviación entre las mismas o esta fuese mínima, la medición final sería el valor promedio de las tres temperaturas.

Todas las sondas de temperatura Pt100 fueron convenientemente calibradas de forma previa a la realización del estudio, en un rango de temperaturas entre 0 y 40°C con ayuda de un horno de calibración FLUKE (Hart Scientific) modelo 9103 con rango de calibración entre -25 y 140°C utilizado como patrón primario. Este horno se muestra en la Figura II.8a. Todos los puntos de calibración controlados se ajustaron de forma muy satisfactoria a un comportamiento lineal ($R^2 > 0,999$), justificándose de este modo la validez de las medidas de temperatura corregidas con las correspondientes rectas de calibración. La precisión proporcionada por los sensores se estima en $\pm 0,1^\circ\text{C}$.



Figura II.8 *a) Horno de calibración de temperatura 'FLUKE 9103', b) adquisidor de datos 'Agilent 34972A'.*

Las medidas tomadas por los sensores de temperatura deben ser recogidas por medio del correspondiente sistema adquisición de datos (SAD). Este debe servir de interfaz entre el computador digital y el sistema físico, permitiendo capturar, acondicionar y procesar las señales eléctricas procedentes de diversos tipos de sensores (en este caso únicamente sondas Pt100). Las

señales transformadas en valores numéricos posibilitan su representación gráfica, análisis e interpretación posterior. En el caso particular de este estudio se empleó un adquisidor 'Agilent 34972A' con capacidad para tres tarjetas electrónicas con más de 20 canales cada una (ver Figura II.8b). Los datos correspondientes a los distintos ensayos se guardaron en dispositivos de almacenamiento externo con conexión USB y todo el post-procesado de los valores registrados se realizó posteriormente en hojas de cálculo Excel.

II.1.5 Elementos de distribución

Para suministrar a la instalación del aire proporcionado por la UTA se emplean una serie de conductos que conectan con el resto de elementos de la instalación distribuyendo dicho aire por la misma.

Por lo tanto, para el suministro de aire se utilizaron, conductos flexibles de PVC de 250 mm de diámetro que permiten la conexión a la Unidad de Tratamiento de Aire y a los elementos necesarios para realizar el ensayo.



Figura II.9 Conductos de distribución de aire

II.2 Caracterización de las piedras

II.2.1 Densidad

Es necesario calcular la densidad de las piedras, "pebbles", tanto las de tamaño grande como las de tamaño pequeño, para demostrar que no difieren uno de otro, al ser del mismo material. El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Se cuenta un número de piedras y se pesa para obtener la masa en kilogramos.



Figura II.10 Cálculo de masa de las piedras.

2. Se colocan las piedras en un cubo cilíndrico de 27,2 cm de diámetro, de manera uniforme, evitando huecos entre las mismas, este procedimiento es absolutamente necesario para precisar lo máximo posible.



Figura II.11 Colocación de las piedras en el cubo para medir la densidad.

3. Una vez terminado, se procede a echar un volumen de agua previamente medido, que cubra la totalidad de las piedras. Esto se realiza para calcular el volumen del líquido desalojado por estas, el cual será la diferencia entre el volumen total (vol. agua + piedras) (ver E-II.3) y el volumen de agua previamente medido. Para el cálculo del volumen total se mide la altura del nivel de agua del conjunto, por lo que, conocida está y el área transversal del cubo cilíndrico, se obtiene dicho volumen.



Figura II.12 Conjunto de piedras con agua para cálculo de volumen desalojado.

A continuación se muestra la ecuación para la obtención del volumen total.

$$V_{conjunto} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H_{pebble + H_2O} \quad (E- II.3)$$

4. Finalmente, el cálculo de la densidad real viene dado por la masa neta de las piedras entre el volumen desalojado, definida por la siguiente ecuación:

$$\rho_{pebble} = \frac{masa_{pebbles}}{V_{conjunto} - V_{H_2O}} = \frac{masa_{pebbles}}{V_{desalojado}} = \left[\frac{Kg}{l} \right] \quad (E- II.4)$$

A continuación se muestran los datos obtenidos para los diferentes tamaños en la siguientes tablas, Tabla II.1 para tamaño pequeño y Tabla II.2 para tamaño grande.

Tabla II.1 Cálculo de densidad para piedras de tamaño grande

Tamaño pequeño en cubo de $\varnothing 27,2 \text{ cm}$	
Nº Piedras	100
Peso pebbles	7,10 kg.
Volumen H ₂ O	3 litros
Nivel de agua del conjunto (Pebble + H ₂ O)	11,2 cm.
Volumen desalojado	3,5 litros
$\rho_{pebble} = \frac{7,10 \text{ Kg}}{3,5 \text{ l}}$	2,028 kg/l

Tabla II.2 Cálculo de densidad para piedras de tamaño grande

Tamaño grande en cubo de Ø27,2 cm	
Nº Piedras	60
Peso pebbles	12,90 kg.
Volumen H ₂ O	4,5 litros
Nivel de agua del conjunto (Pebble + H ₂ O)	17,8 cm.
Volumen desalojado	5,84 litros
$\rho_{pebble} = \frac{12,90 \text{ Kg}}{5,84 \text{ l}}$	2,210 kg/l

Se puede observar que existe una ligera diferencia entre las de tamaño grande y pequeño, al ser de forma experimental, existe la posibilidad de una colocación menos uniforme en el tamaño pequeños lo que ha llevado a esa diferencia, pues se tomará como valor real el de tamaño grande ya que es el valor que más se aproxima al material sílex, del que generalmente están compuestas las piedras utilizadas, que corresponde a un valor algo menor que el cuarzo por contener agua, siendo esta última, con una densidad de, $\rho_{cuarzo} = 2,6 \text{ gr/cm}^3$ según [W-6].

II.2.2 Calor específico

La composición de las piedras utilizadas es generalmente sílex, SiO₂, pues a partir de los datos para un determinado rango de temperaturas recogidos en el libro "Handbook of Thermodynamic Tables and Charts" [8, Raznjevic K., 1976], se ajustan a través de una recta de regresión obteniéndose una dependencia lineal para establecer un determinado calor específico para cada temperatura que queramos aplicar entre 0 y 300 °C.

Tabla II.3 Calor específico SiO₂ para diferentes temperaturas. Fuente: [8, Raznjevic K., 1976]

Temperatura		Specific Heat (C _p)	
°C	°K	KJ/kg K	Kcal/Kg K
0	273,15	0,712	0,170
20	293,15	0,745	0,178
100	373,15	0,854	0,204
300	573,15	1,055	0,252

Si realizamos el análisis C_p(KJ/kg·K)=f(T°C) obtenemos una recta de regresión lineal de tal manera que se pueda calcular el calor específico para cualquier valor dentro del citado rango anteriormente a partir de la siguiente ecuación:

$$Cp_{pedras}(T) = 0,0011 \cdot T + 0,7231$$

$$R^2=0,993$$
(E- II.5)

II.3 Calibración de las placas orificio

Como se ha comentado anteriormente es necesario obtener la medida del caudal que circula por la instalación y para ello se emplearon las placas orificio detalladas en el apartado II.1.3 fabricadas en tubería PVC.

Para realizar una correcta medición es necesario realizar la calibración de dichas placas. Por ello se usaron una serie de elementos necesarios para dicha calibración.

Las placas se calibraron a través de una tobera abierta TECNER TG-50 de acero inoxidable sobre la que se recogieron las variaciones de carga de cada ensayo mediante un transductor digital como el mostrado en la figura II.4, para así obtener la medición del caudal, con el fin de relacionar los caudales de aire a través de las placas orificio y la pérdida de carga al atravesarlas.

De esta manera se obtiene la constante característica del dispositivo K, que corresponde a un valor constante, función del caudal que circula por el dispositivo y de la pérdida de carga que produce dicho caudal al circular por el interior de éste.

En la figura II.13 se puede apreciar una imagen de la tobera utilizada para la calibración del caudal:



Figura II.13 Tobera TG-50

Una vez conocidos los elementos utilizados para la calibración de las placas, se va a comentar el procedimiento utilizado para realizarla.

Para conocer el caudal de aire definido como real circulante por la tobera, se obtiene a través de la recta determinada por la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_{Real} = 10^{0,0018 + 0,5044 \cdot \log(\Delta P)} = [m^3/min] \quad (E-II.6)$$

En la figura II.14 se puede apreciar las rectas de calibración de las toberas, determinadas por la ecuación (E-II.6) que relacionan las pérdidas de carga, en mm.c.a, en la tobera y el caudal de aire que circula por ella. De esta manera se puede obtener gráficamente el caudal a través de la lectura de las variaciones de presión tomadas en el transductor digital.

Conociendo el tipo de tobera y las pérdidas de carga a través de ésta o bien el gasto de aire que circula se puede entrar en la gráfica mediante el eje horizontal o vertical respectivamente con sus correctas unidades para hallar el valor que se desconozca.

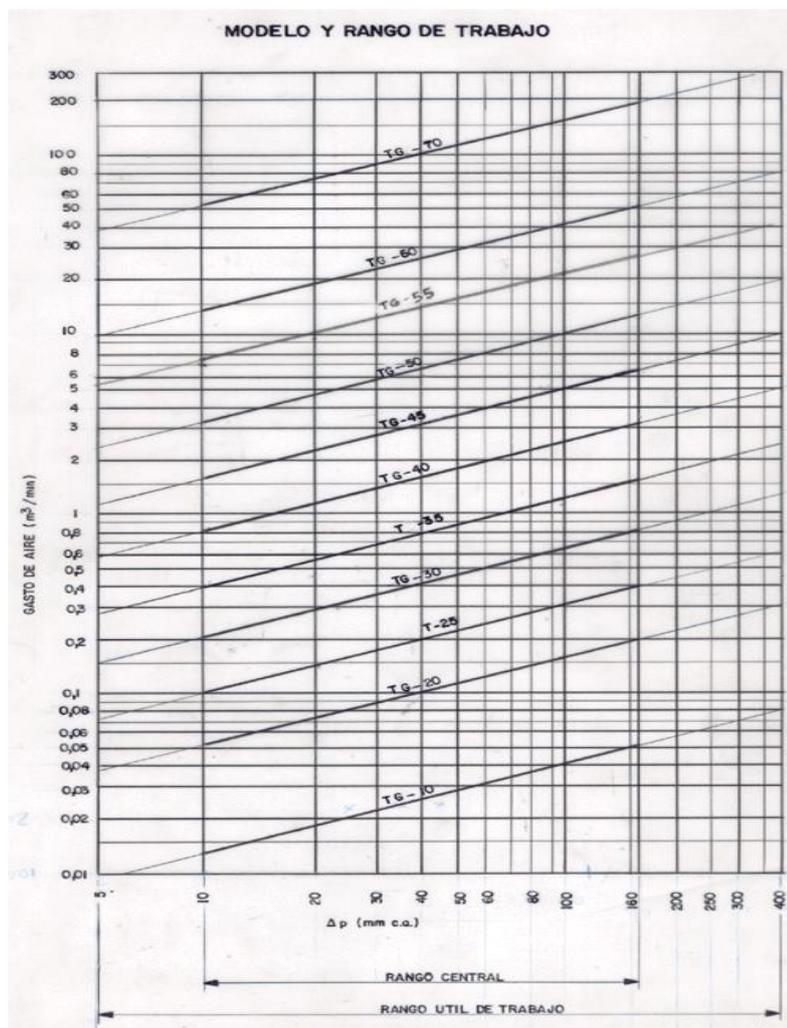


Figura II.14 Rectas de calibración caudal-pérdidas de carga tobera TG

Para realizar la calibración de las placas orificio, estas se disponen en serie y a suficiente distancia, la tobera. Una vez colocadas, se trata de medir las pérdidas de carga tanto en la placa objeto de calibración como en la tobera.

Con la lectura obtenida debido a la caída de presión en la tobera, y la tabla mostrada en la figura II.14 se determina el caudal que circula tanto por la tobera como por la placa.

Por último, a través de la diferencia de presión tomadas en la placa orificio se estudia la correlación de estas con los caudales que circulan por la placa orificio medidos a través de la caída de presión en la tobera.

A modo de ejemplo, se muestra a continuación la calibración de la placa orificio P04, ya que las utilizadas en este estudio, P07 y P06, fueron calibradas anteriormente y se han tomado las constantes de dicha calibración, $K_{07}=76,13$ y $K_{06}=77,17$, a la entrada y a la salida respectivamente.

Primeramente, a través del transductor se toman las variaciones de presión en la tobera, y en la placa orificio, como se muestra a continuación en la tabla II.4.

Tabla II.4 Variación de la presión en la tobera y placa orificio. Caudal real.

$\Delta P_{tobera}(\text{mm.c.a.})$	$\Delta P_{tobera}(\text{Pa})$	$\Delta P_{04}(\text{mm.c.a.})$	$\Delta P_{04}(\text{Pa})$	$\dot{V}_{Real}(\text{m}^3/\text{min})$	$\dot{V}_{Real}(\text{m}^3/\text{h})$
20,41	200	13,57	133	4,60	275,81
25,61	251	17,35	170	5,15	309,30
25,82	253	18,06	177	5,18	310,54
39,69	389	27,14	266	6,43	385,79
20	196	12,65	124	4,55	273,02
5,82	57	3,98	39	2,44	146,43
5,82	57	3,88	38	2,44	146,43
12,24	120	8,27	81	3,55	213,17
44,49	436	29,80	292	6,81	408,63
22,55	221	15,51	152	4,83	290,06
33,78	331	23,06	226	5,93	355,61

Una vez se ha obtenido el caudal a partir de la ecuación (E-II.6), se determina la constante K de la placa orificio a través de la ecuación que relaciona el caudal en m³/h y la pérdida de presión en pascales (Pa.) ocasionada en la tobera y la placa.

Ya que el caudal es proporcional a la velocidad, se puede determinar para cualquier dispositivo en el que exista una pérdida de carga, la relación de la ecuación E-II.7.

$$K = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta P}} \quad (\text{E- II.7})$$

Tabla II.5 Constante característica K de la tobera y placa orificio.

	<i>K_{tobera}</i>	<i>K₀₄</i>
	19,50	23,92
	19,52	23,72
	19,52	23,34
	19,56	23,65
	19,50	24,52
	19,40	23,45
	19,40	23,75
	19,46	23,68
	19,57	23,91
	19,51	23,53
	19,54	26,65
Valor medio	19,4989	23,7394

Una vez determinada la constante K que caracteriza el dispositivo a través del valor medio de los ensayos, se procede a analizar el error cometido usando este valor promedio como valor característico de la tobera y la placa orificio, calculando el nuevo caudal despejando dicha variable a través de la ecuación (E-II.7).

Tabla II.6 Errores tobera y placa orificio.

$\dot{V}_{Real}(m^3/h)$	$\dot{V}_{K\ tobera}(m^3/h)$	$\dot{V}_{K04}(m^3/h)$	Error tobera	Error P04
275,81	275,76	273,78	-0,02%	-0,74%
309,30	308,92	309,52	-0,12%	-0,07%
310,54	310,15	315,83	-0,12%	1,71%
385,79	384,58	387,18	-0,31%	0,36%
273,02	272,99	264,35	-0,01%	-3,17%
146,43	147,21	148,25	0,53%	1,24%
146,43	147,21	146,34	0,53%	-0,06%
213,17	213,60	213,66	0,20%	0,23%
408,63	407,15	405,66	-0,36%	-0,73%
290,06	289,87	292,68	-0,06%	0,90%
355,61	354,75	356,88	-0,24%	0,36%

II.4 Calibración sondas de temperatura

De la misma forma que para el caudal, es necesario una calibración de la temperatura, ya que es un factor muy importante para el experimento a realizar, por ello, se realiza una calibración de cada una de las 9 sondas que se utilizan en la instalación, colocadas como se mostró en la figura II.6.

La calibración, como se ha definido anteriormente, se realizó en un ambiente controlado para que no influyese en la medición otros factores que pudieran distorsionar los resultados. En la calibración se ha determinado un análisis de regresión a través de la recta obtenida por los resultados de la medición y los reales.

En la siguiente figura II.15 podemos ver la evolución de las sondas, que debería ser semejante entre ellas, al variar la temperatura en función del tiempo. Se ajusta el intervalo de tiempo para la lectura de datos cada 10 décimas de segundo y la evolución de la temperatura se realiza de 0 a 45 °C.

En la siguiente figura se puede observar dicha evolución.

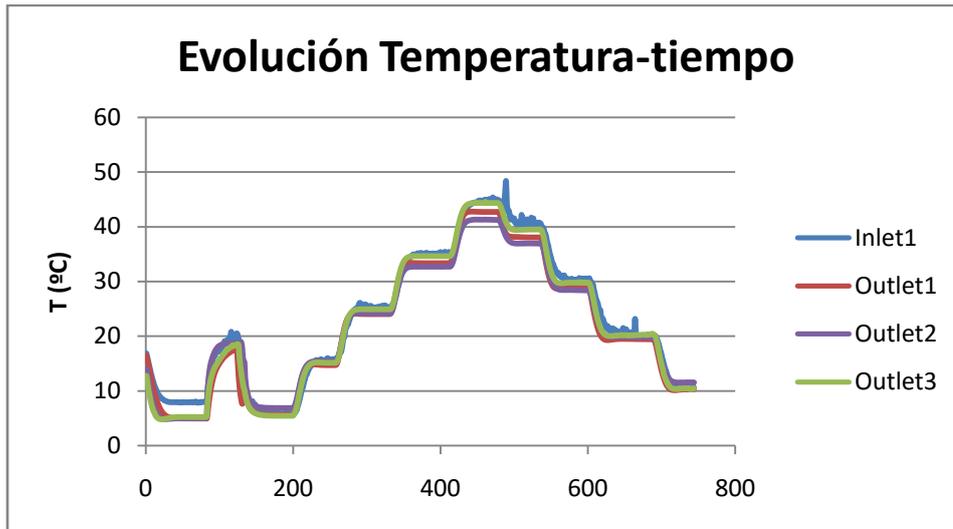


Figura II.15 Evolución de la temperatura en función del tiempo.

Como se había predicho anteriormente, la evolución de las sondas es semejante entre sí, luego, con los datos obtenidos, se puede extraer la diferencia entre la temperatura de consigna tomada como valor real y la medida como se muestra en la gráfica de la figura II.16 a continuación:

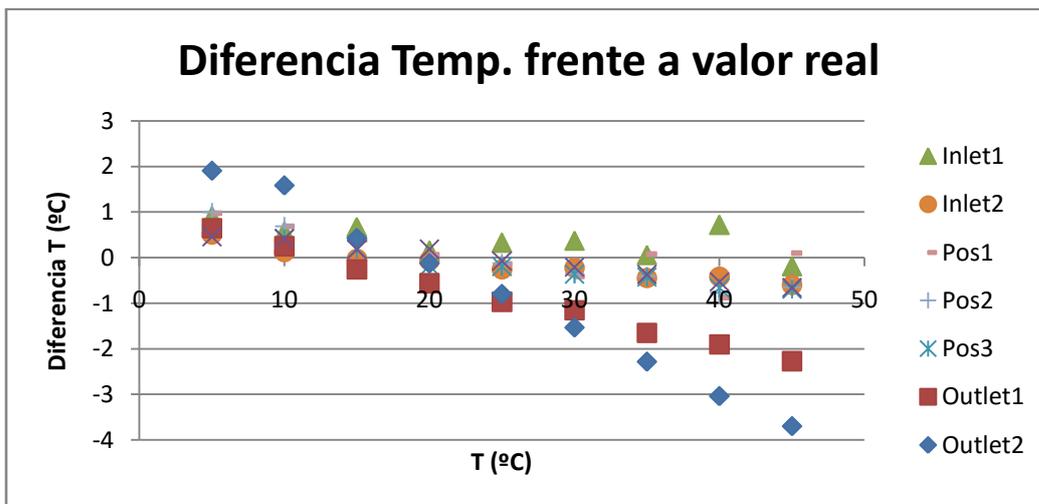


Figura II.16 Diferencia entre la temperatura medida frente al valor tomado como real.

Se puede apreciar tras el gráfico una desviación de la temperatura medida frente a la de consigna en todas las sondas, incrementándose de manera general al aumentar la temperatura de consigna, llegando a un valor máximo de desviación de hasta 3,693 °C para 45 °C en una de ellas. Por regla general podemos establecer una dispersión entre 1,5 y -1,5 °C del valor tomado como real, de promedio entre todas las sondas.

De estos datos, también extraemos la diferencia máxima y mínima entre las dos temperaturas, calculando así los errores absolutos y relativos, (ver Tabla

II.7) así como las rectas de regresión lineal entre la real de consigna y la medida para la corrección de los datos experimentales (ver Tabla II.8).

Tabla II.7 Error absoluto y relativo para las sondas de temperatura.

	Sondas Inlet			Sondas Pebbles			Sondas Outlet		
	1	2	3	Pos1	Pos2	Pos3	1	2	3
Máximo abs.	0,907	-0,600	0,753	0,977	0,997	-0,689	-2,271	-3,693	-0,655
Mínimo abs.	0,057	-0,065	0,062	-0,061	-0,122	0,178	0,249	-0,128	-0,077
Error relativo medio (%)	3,790	1,923	2,100	3,759	4,024	2,836	4,682	9,786	2,259

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos del análisis de regresión que da lugar a las rectas de calibración con un comportamiento lineal, que resulta ser satisfactorio ya que se ha obtenido un comportamiento lineal con $R^2 > 0,999$ en todos los casos. Justificándose de este modo la validez de las medidas de temperatura corregidas con las correspondientes rectas de calibración.

Tabla II.8 Rectas de regresión para calibración de las sondas de temperatura.

	Sondas Inlet			Sondas Pebbles			Sondas Outlet		
	1	2	3	Pos1	Pos2	Pos3	1	2	3
Pendiente	1,016	1,026	0,979	1,052	1,051	1,037	1,077	1,167	1,030
Ordenada	-0,817	-0,619	0,192	-1,308	-1,305	-0,846	-0,987	-3,210	-0,687
R²	0,999	1	0,991	1	1	1	1	0,999	1

A través de los valores de la tabla se procede a la corrección de los datos mediante las rectas de calibración, obteniéndose de esta manera los siguientes resultados como se aprecia en la siguiente tabla II.9. Calculando al igual que la tabla II.7 los errores absolutos y relativos respecto al valor tomado como real, el de consigna.

Tabla II.9 Errores absoluto y relativo de los valores calibrados.

	Sondas Inlet			Sondas Pebbles			Sondas Outlet		
	1	2	3	Pos1	Pos2	Pos3	1	2	3
Máximo abs.	0,553	-0,258	0,147	1,179	-0,421	-0,285	0,109	0,309	0,106
Mínimo abs.	0,042	-0,006	-0,018	-0,014	-0,005	0,005	0,031	-0,005	8,81E-5
Error relativo medio (%)	1,099	0,799	0,940	0,915	0,674	0,423	0,488	0,889	0,327

Como podemos apreciar, al calibrar los datos obtenidos, debido al buen ajuste lineal que se obtiene, el error disminuye significativamente siendo el error relativo menor al 1% en todos los casos excepto en uno, que difiere de este muy levemente, pudiendo considerar de manera general un error relativo menor al 1% en todas las sondas.

II.5 Toma de datos y diseño de experimentos

En esta sección se muestra una serie de datos que se han tomado a lo largo de varios días de experimentación sobre la instalación anteriormente detallada, variando tamaño y caudales, ajustando diferentes temperaturas para cada caudal. Se han recogido la evolución de las temperaturas por las distintas sondas al circular el aire a lo largo de toda la instalación que se muestran a continuación.

También se han recogido los datos del año meteorológico tipo de la región objeto de estudio donde se explicará más adelante.

Diseño de Experimentos

Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de termotecnia de la Universidad de Valladolid donde se recogieron una serie de datos a lo largo de diferentes días.

Una vez montada la instalación y dispuestas las sondas en su posición, se estableció que el equipo de medida tomase datos cada 18 segundos, para observar detalladamente cómo evolucionaba la temperatura del aire y de las piedras en cada posición donde se colocaron las sondas y poder comparar los resultados posteriormente. Como se explica anteriormente se usan sondas Pt100 colocadas en posición estratégica donde se quiere obtener el valor de dicha temperatura.

En el conducto de entrada se disponen 3 sondas Pt100, para evitar problemas de error, en caso de fallo de alguna de las sondas. Si no se observa dispersión o la variación es mínima entre sí se realiza el valor medio para obtener el resultado de la temperatura final. El mismo procedimiento se realiza para la salida.

En el conducto donde se monta el conjunto de piedras se disponen también de tres sondas, dispuestas en la entrada, mitad y salida para tomar datos de temperatura en los diferentes puntos y ver cómo afecta la temperatura de las piedras el paso del aire.

Para la recogida de datos, con la instalación completamente montada se procede de la siguiente manera:

1. Se arranca la UTA, para que circule aire por toda la instalación y se regula el caudal deseado, enfriando las piedras.
2. Se desconecta el conducto de distribución de entrada comunicado con el conjunto de pebbles y se ajusta el aire a la temperatura deseada. La razón de este procedimiento es para que adquiera la temperatura requerida y no se produzca el calentamiento del aire paulatinamente en contacto con las piedras, ya que en una instalación real el aire atmosférico está a una temperatura definida y no se calienta de manera progresiva.
3. Una vez se alcanza la temperatura de consigna, se conecta el conducto de entrada como se disponía en la forma inicial y se procede a la toma de datos.

A parte de los datos de temperatura tomados por las sondas, se recogieron datos de la diferencia de presión en cada una de las placas orificio, para después calcular el caudal estimado (ver E-II.7) a través de la constante $K_{07/06}$ previamente calculada, a la entrada y salida respectivamente.

Se ha seleccionado dos tamaños de piedras, grande y pequeño, sobre el que se experimentará con diferentes niveles de caudal (N.C.) y temperaturas (°C). A continuación se muestra una tabla donde se refleja los datos disponibles que serán objeto de evaluación.

Tabla II.10 Datos disponibles en función del tamaño de la piedra con temperatura y caudal de aire.

$N.C. (m^3/h) / T(^{\circ}C)$	Tamaño Grande			Tamaño pequeño		
	N.1	N.2	N.3	N.1	N.2	N.3
25	X	X	X	X	X	X
30	X	X	X	X	X	X
35	X	X	X	X	X	X
40	X	X		X	X	X
45			X			X
50			X			X

A continuación se detalla gráficamente la toma de datos y como se llevaron a cabo los diferentes experimentos.

Debido a los numerosos experimentos existentes, y la similitud apreciada entre ellos se va a mostrar a continuación algún ejemplo de cada tamaño TG (grande) y TP (pequeño) para diferentes temperaturas y niveles de caudal, quedando todos recogidos y mostrados en el Anexo I.

Se han seleccionado a modo de ejemplo una serie de experimentos que serán objeto de estudio en el capítulo III. Se muestran a continuación dichos experimentos abarcando un rango de temperaturas desde un mínimo, de 25°C hasta un máximo de 50°C en la temperatura de entrada del aire, para determinar cómo influye la variación de temperatura con el tamaño de las piedras, teniendo en cuenta diferentes caudales para cada variación de la misma, a través de los niveles de caudal máximo y mínimo, pudiendo así observar más notablemente como afecta el caudal en el tiempo de calentamiento.

Día 1 (23 de Octubre). N. Caudal: 3. Temperatura: 50°C. TG

Con la instalación montada se arranca la UTA para establecer el caudal.

Se establece una temperatura en la UTA de 50°C para que el aire a la entrada del sistema alcance esa temperatura.

10:20. Comienzo. Establecimiento caudal

11:44. Desconexión.

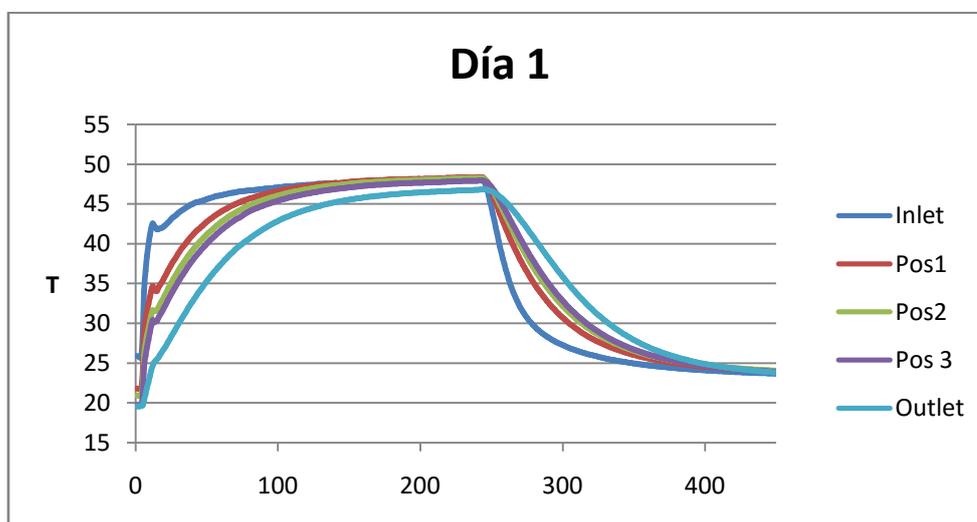


Figura II.17 Evolución de la temperatura aire a 50°C y piedras TG

En el gráfico se observa la evolución de la temperatura del aire, y como aumentan la temperatura de las piedras según el paso del mismo hasta alcanzar un estado estacionario antes de enfriar el sistema.

Día 2 (27 de Octubre). N. Caudal: 3. Temperatura: 35°C. TG

Se establece una temperatura en la UTA de 35 °C con una temperatura inicial similar a la anterior procediendo de la misma manera.

17:15. Comienzo

18:36. Desconexión.

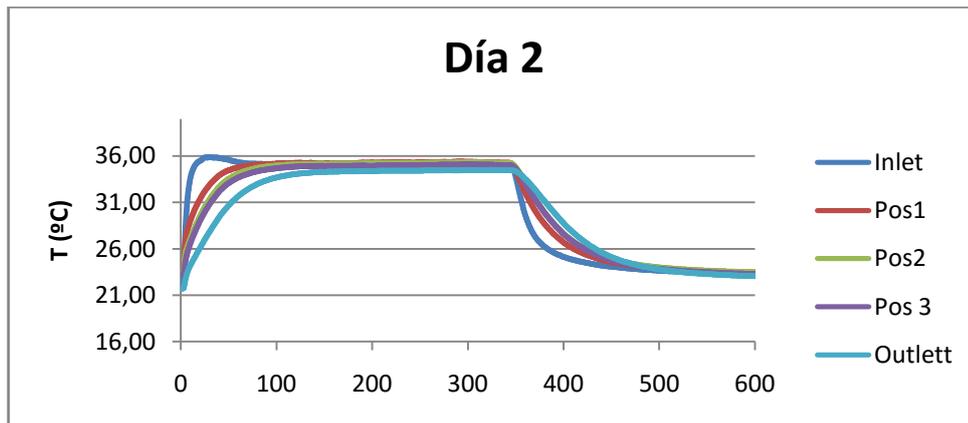


Figura II.18 Evolución de la temperatura aire a 35°C y piedras TG

Se puede apreciar en el gráfico que al ser el incremento de temperatura menor, se alcanza el equilibrio en un tiempo menor, las pendientes en el periodo transitorio son más grandes.

Día 3 (28 de Octubre). N. Caudal: 3. Temperatura: 30°C. TG

Del mismo modo, establecemos la temperatura de consigna de la UTA en 30°C.

09:00. Comienzo

10:52. Parada.

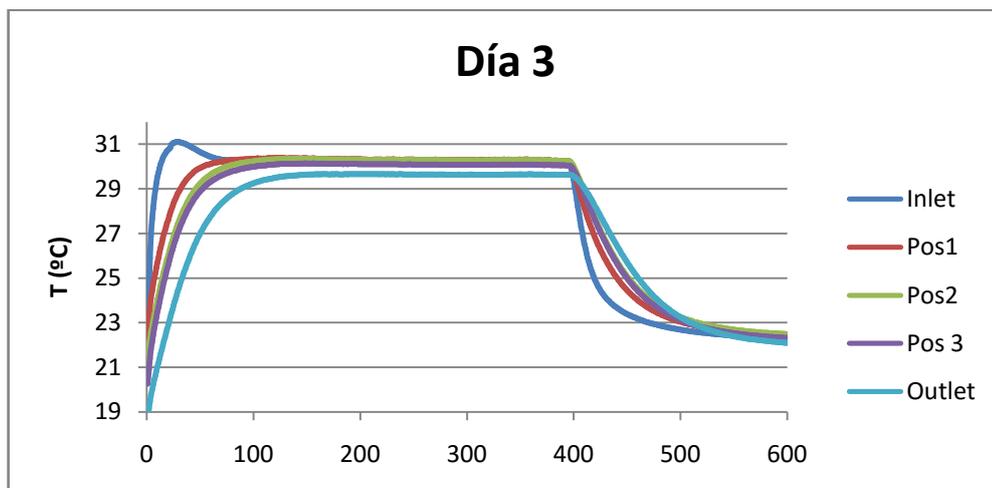


Figura II.19 Evolución de la temperatura aire a 30°C y piedras TG

La gráfica II.19 muestra la evolución de la temperatura del aire a su paso por las piedras para una temperatura de consigna de 30 °C, se aprecia en la misma, como las pendientes en el estado transitorio son aún mayores que el anterior, pues la temperatura se alcanza más rápido.

Día 7 (4 de Noviembre). N. Caudal: 1. Temperatura: 40°C. TG

Se establece una temperatura de consigna de 40°C y se procede de la misma manera que el anterior, esta vez con el nivel de caudal mínimo.

10:00. Comienzo

11:30. Parada y comienza a enfriarse

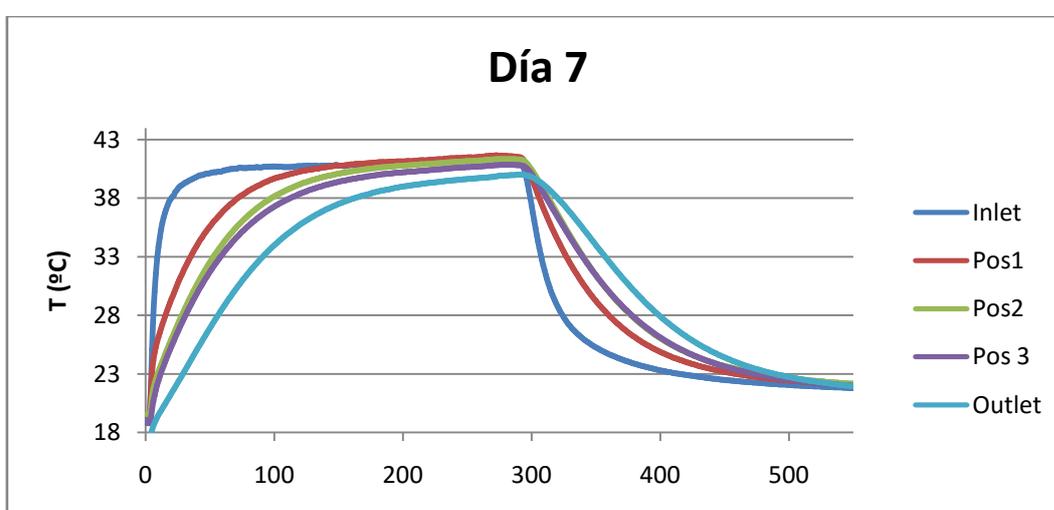


Figura II.20 Evolución de la temperatura del aire a 40°C.

La gráfica muestra la evolución en la temperatura del aire al atravesar el sistema de piedras, imponiendo una corriente de aire a la entrada de 40°C. Al haber disminuido el nivel de caudal al mínimo que consideramos para este estudio, el tiempo hasta alcanzar el estacionario se eleva, incluso es muy similar al tiempo que tarda en alcanzarlo en la figura II.17 con un incremento de temperatura 10°C mayor, pero un nivel de caudal máximo.

Día 8 (5 de Noviembre). N. Caudal: 1. Temperatura: 25°C. TG

Se fija la última temperatura de 25°C para este caudal y tamaño de piedras. El procedimiento seguido es exactamente el mismo a los caudales anteriores.

09:15. Comienzo

10:55. Parada y comienza a enfriarse.

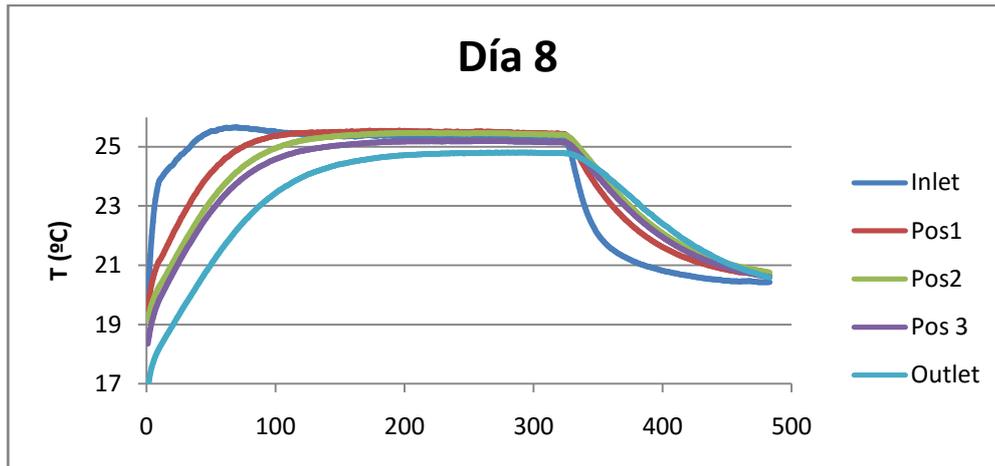


Figura II.21 Evolución de la temperatura aire a 25°C y piedras TG

Una vez se tomaron todos los experimentos para las diferentes temperaturas y caudales, se cambió el sistema de almacenamiento por una cantidad de piedras de distinto tamaño, un tamaño menor para comprobar de igual manera, la evolución de las temperaturas, y como podría influir las variables modificadas.

A continuación se muestran las gráficas de los datos tomados durante el ensayo para los mismo niveles de caudal y temperaturas que el tamaño anterior, de esta forma, puedan ser objeto de comparación.

Día 9 (24 de Noviembre). N. Caudal: 3. Temperatura: 50°C. TP

Variamos el caudal, ajustando al nivel de caudal requerido y comenzamos con la temperatura más alta como en los anteriores.

09:20. Comienzo

10:52. Parada

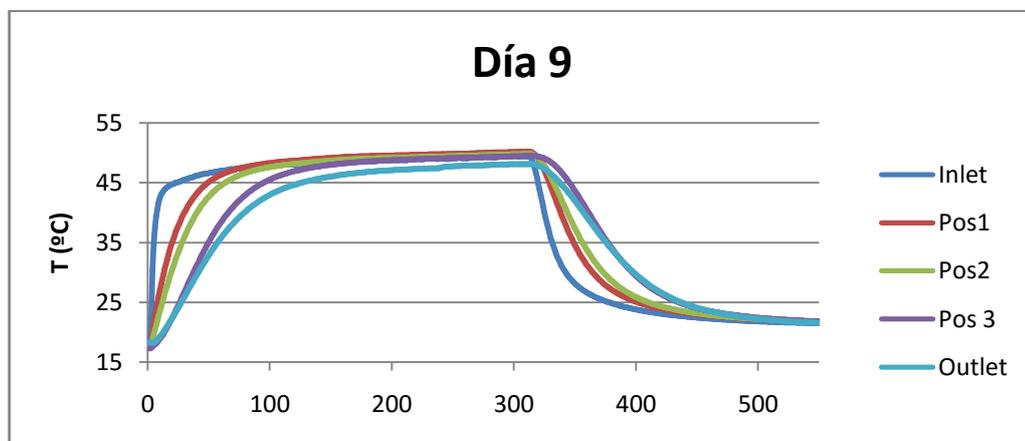


Figura II.22 Evolución de la temperatura aire a 50°C y piedras TP

Evolución de la temperatura del aire y de las piedras al calentar y enfriar después, con el caudal fijado.

Día 14 (25 de Noviembre). N. Caudal: 3. Temperatura: 35°C. TP

Para el mismo caudal, con 35 °C se muestra la evolución de las temperaturas.

09:00. Comienzo

10:30. Parada

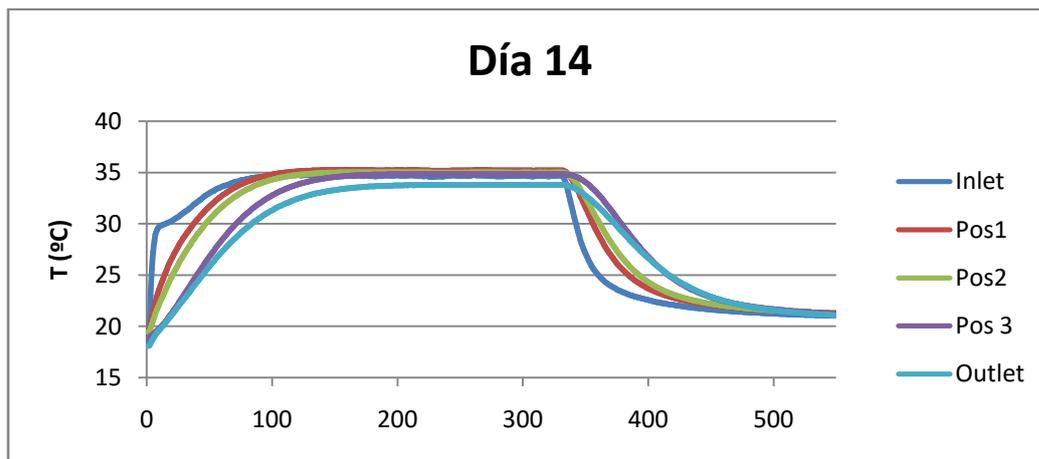


Figura II.23 Evolución de la temperatura aire a 35°C y piedras TP

Día 14 (25 de Noviembre). N. Caudal: 3. Temperatura: 30°C. TP

Para el mismo caudal, fijando una temperatura de consigna del aire en la UTA de 30°C como en el caso de tamaño grande, se obtiene la evolución de temperaturas.

12:36. Comienzo.

14:00. Parada.

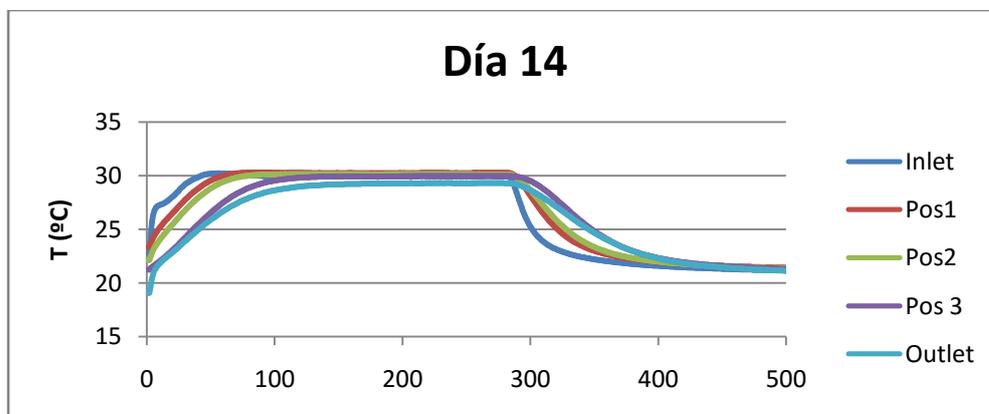


Figura II.24 Evolución de la temperatura aire a 30°C y piedras TP

Día 17 (1 de Diciembre). N. Caudal: 1. Temperatura: 40°C. TP

Ajustamos por último un nuevo caudal, con la temperatura de consigna a 40°C.

17:28. Comienzo.

19:15. Parada.

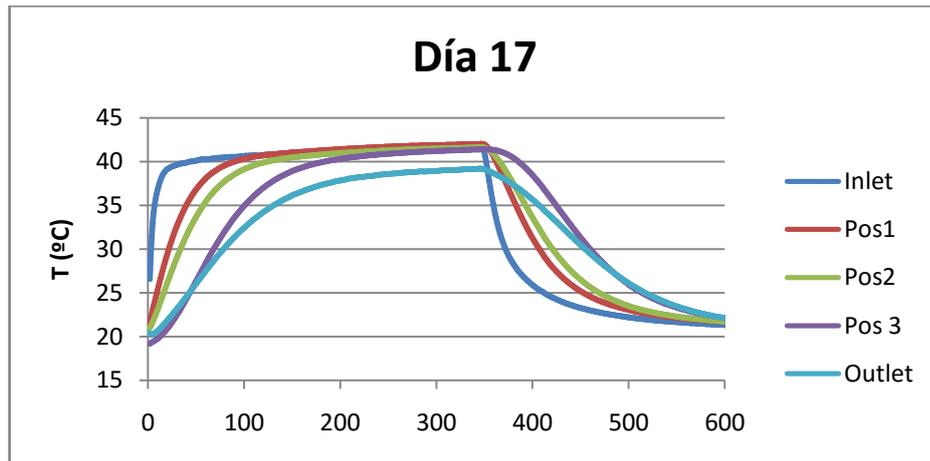


Figura II.25 Evolución de la temperatura aire a 40 °C y piedras TP

Día 19 (3 de Diciembre). N. Caudal: 1. Temperatura: 25°C. TP

Se realiza el último experimento para este nivel de caudal y tamaño, con temperatura de consigna de 25 °C para el aire.

16:55. Comienzo.

18:30. Parada.

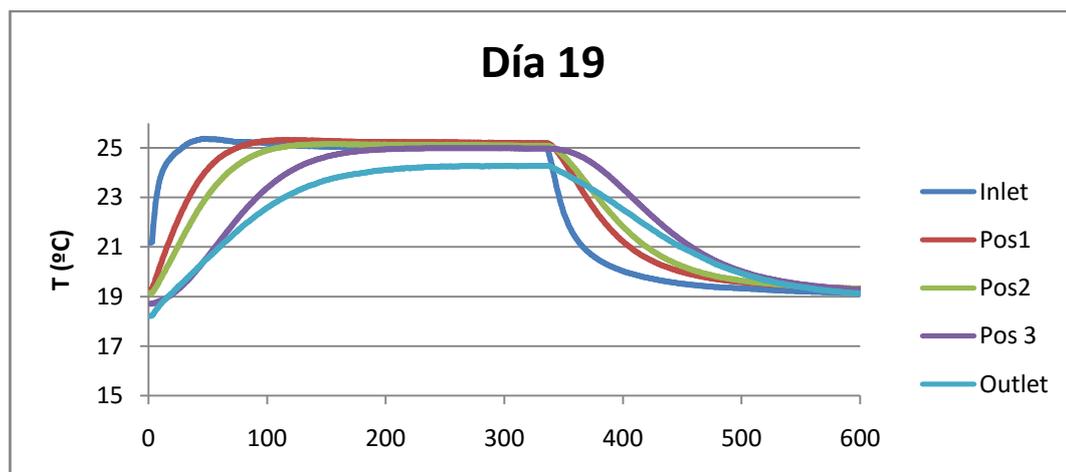


Figura II.26 Evolución de la temperatura aire a 25°C y piedras TP

II.5.1 Año meteorológico tipo

El año meteorológico tipo se compone de un conjunto de valores o datos, entre ellos la temperatura seca, variable de especial interés en este estudio, a cada hora del día, que hacen un total de 8.760 horas o datos recogidos en la tabla. La generación de este tipo de datos tiene una gran importancia para la realización de cálculos en muchas aplicaciones relativas a la ingeniería térmica o energías renovables.

Al tener registrada la variable de temperatura seca durante cada hora del año, se puede establecer las temperaturas máximas, mínimas, promedios etc., del año en general, de manera mensual o diaria, lo cual supone una gran ventaja para conocer el clima exacto sobre el que se quiere realizar el estudio.

Los datos de temperaturas máximas y mínimas y su diferencia por cada día se muestran en el Anexo II.

Capítulo III

Cálculos y Resultados

En este capítulo se muestran todos los cálculos realizados para la obtención de resultados del experimento en cuestión, mostrando todo aquello necesario para entender de forma clara y definida la realización de dichos cálculos, así como, definiciones, ecuaciones o gráficos.

Una vez obtenidos todos los resultados objeto de estudio se analizarán extrayendo conclusiones y mejoras posibles para trabajos futuros, en la misma línea de investigación o similares.

III.1 Introducción

Una vez se han calibrado todos los dispositivos utilizados en la instalación, tanto por los que circula el aire utilizado como los dispositivos utilizados en la medición y se tomaron todos los datos necesarios, se procede a la realización de los cálculos de dicho estudio con el fin de obtener una serie de resultados y sus posteriores conclusiones.

Por tanto, primeramente se comparan los gráficos obtenidos con el fin de extraer información relevante que pueda ser utilizada en futuras instalaciones reales de sistemas

de acumulación de este tipo.

Una vez realizado, se procederá al estudio de una posible aplicación del sistema de acumulación de energía mediante piedras en una vivienda.

III.2 Análisis de datos

Se quiere observar cómo afectan los incrementos de temperatura del aire a su paso por el sistema de piedras, hasta alcanzar la temperatura de equilibrio con los diferentes tamaños existentes. Para ello, se ha analizado a través de una variable adimensional θ , cómo evoluciona el flujo de calor, con respecto al máximo que se puede obtener, suponiendo que la temperatura del conjunto de piedras, es el promedio de las tres sondas colocadas en las tres posiciones en contacto con las piedras (ver E-III.1)

$$\theta = \frac{T_i - T_{m\acute{a}x}}{T_{m\acute{i}n} - T_{m\acute{a}x}} \quad (\text{E- III.1})$$

Siendo T_i la temperatura a la que evolucionan las piedras y el aire de salida, $T_{m\acute{a}x}$ la temperatura del aire a la entrada (máxima temperatura que podrían alcanzar las piedras) y $T_{m\acute{i}n}$ la temperatura inicial de las piedras.

El caudal también supone un factor clave para el estudio del sistema de acumulación, ya que se puede observar en los siguientes análisis para diferentes variaciones de temperatura, como a mayor caudal, menor es el tiempo en el que se alcanza el equilibrio.

Como se ha obtenido la pérdida de carga que se produce al atravesar el aire las placas orificio tanto a la entrada como a la salida y en el sistema de piedras, se puede determinar el caudal conociendo la constante característica de éstas ya calibrada, según la ecuación E-II.7. Es necesario conocer dicha variación de presión a la entrada, pues de esta manera, se consigue un valor de caudal lo más preciso

posible pudiéndose comparar ambos tamaños de forma eficiente, logrando las mismas condiciones de caudal y temperatura.

Para la obtención de la constante características de las piedras, se ha evaluado la pérdida de carga para diferentes caudales a la entrada, a la salida y en el tubo PVC donde se introducen las mismas.

A través de la ecuación E-II.7 se puede determinar el caudal en estos instantes, y con éstos, la constante K de las piedras a la entrada y a la salida, determinando a través de un promedio entre éstas la constante característica global K del sistema de piedras.

A continuación se muestra un ejemplo para un determinado tamaño, realizándose de la misma manera en el tamaño restante.

Tabla III.1 Cálculo constante característica K en piedras de tamaño pequeño (TP).

ΔP_{ent} (Pa)	ΔP_{piedr} (Pa)	ΔP_{sal} (Pa)	\dot{V}_{ent} (m ³ /h)	\dot{V}_{sal} (m ³ /h)	$\dot{V}_{pérdidas}$ (m ³ /h)	K_{ent_piedr}	K_{sal_piedr}
194,00	538,00	115,00	1060,37	827,51	232,86	45,72	35,68
193,00	546,00	116,00	1057,63	831,11	226,53	45,26	35,57
193,00	532,00	118,00	1057,63	838,24	219,40	45,85	36,34
188,00	525,00	117,00	1043,84	834,68	209,17	45,56	36,43
185,00	516,00	121,00	1035,48	848,83	186,66	45,58	37,37
177,00	492,00	115,00	1012,85	827,51	185,33	45,66	37,31
161,00	455,00	108,00	965,98	801,93	164,05	45,29	37,60
122,00	344,00	85,00	840,89	711,44	129,45	45,34	38,36
68,00	202,00	47,00	627,79	529,02	98,76	44,17	37,22
33,00	104,00	25,00	437,33	385,83	51,50	42,88	37,83
20,00	64,00	14,00	340,46	288,73	51,74	42,56	36,09

Se aprecia una diferencia de caudal entre la entrada y la salida, luego existe un caudal de fuga al paso del aire por el sistema de acumulación. Dicho caudal de fuga puede dar lugar a errores en el cálculo de la constante característica K y el resto de valores que se deben tener en consideración.

Una vez obtenidos los resultados, se muestra el valor estimado para los dos tamaños:

$$K_{piedras_TG}: 38,20$$

$$K_{piedras_TP}: 40,90$$

Aunque el valor no difiere en gran medida, podemos observar que para un mismo caudal la pérdida de carga es mayor en un sistema de piedras con tamaño grande (ver E-II.7).

Este resultado no se corresponde con el que podría esperarse, ya que, al tener las piedras de tamaño pequeño, un tamaño menor, existirán menos huecos, lo que dificulta el paso de aire a través del sistema dando lugar a unas pérdidas de carga mayores, pero los resultados obtenidos se corresponden con los resultados en trabajos de otros investigadores como Mastouri H., Benhamou B. y Hamdi H. en su artículo "Pebbles Bed Thermal Storage for Heating and Cooling of Buildings" [1].

Una vez explicado el procedimiento a seguir, se muestran a continuación los análisis realizados a partir de los experimentos seleccionados de la tabla II.10, comparando ambos tamaños para iguales condiciones de temperatura y niveles de caudal como se mencionó anteriormente. El resto de datos de la tabla se muestran en el Anexo I.

III.2.1 Análisis 1: 50 °C N.C: 3.

Inicialmente se ha comparado ambos tamaños con los datos obtenidos en los experimentos y mostrados en el capítulo II, (ver figura II.17 y II.22) para una temperatura de 50°C y un nivel de caudal 3.

Se puede observar que el nivel de caudal 3, corresponde aproximadamente a 600 m³/h, el resto de experimentos correspondientes a este nivel, también muestran resultados similares, que corroboran este valor, con el fin de establecer un valor de referencia para este nivel de caudal.

Tabla III.2 Relación de caudales y pérdida de carga 1.

		ΔP (Pa)	\dot{V} (m ³ /h)
Tamaño Grande	Entrada	62	599,45
	Piedras	194	534,80
	Salida	39	481,90
Tamaño Pequeño	Entrada	66,25	619,65
	Piedras	196	572,6
	Salida	41,25	495,63

Al fijarse en los caudales, se puede apreciar lo complicado que supone establecer un caudal fijo ya que, los valores muestran la existencia de un caudal de fuga en el sistema de acumulación.

Si se compara el flujo de calor hasta que se alcanza el estado estacionario con respecto al máximo que se puede obtener, como se ha definido anteriormente para ambos tamaños se observa la siguiente grafica.

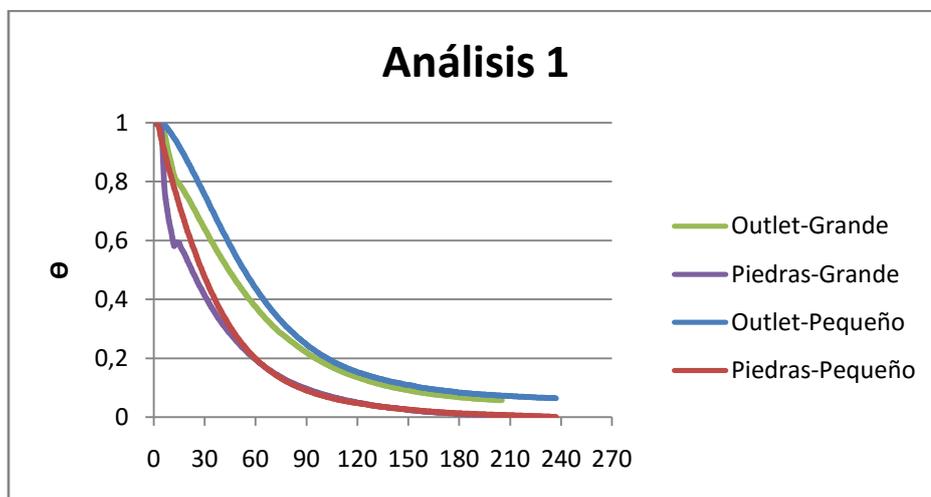


Figura III.1 Relación flujo de calor para T=50°C N.C.:3

En la figura III.1 se muestra cómo la temperatura alcanzada en las piedras, evoluciona hasta llegar a la temperatura de consigna, mientras que el aire a la salida, se enfría, quedando por debajo de su temperatura inicial, luego la energía que pierde el aire a su paso por el sistema, es la misma que ganan las piedras, no apreciándose en este caso diferencia entre ambos tamaños.

También es cierto que se ha de tener en cuenta la diferencia de caudal existente entre ambos tamaños, aunque los caudales se aproximen a 600 m³/h no se ha llegado a conseguir el mismo para éstos, podría existir cierta diferencia en el gráfico si se obtuviese exactamente el mismo valor, aunque tal y como muestra la similitud, en caso de existir alguna variación del gráfico debido a los valores de fuga, esta sería mínima para este incremento de temperatura.

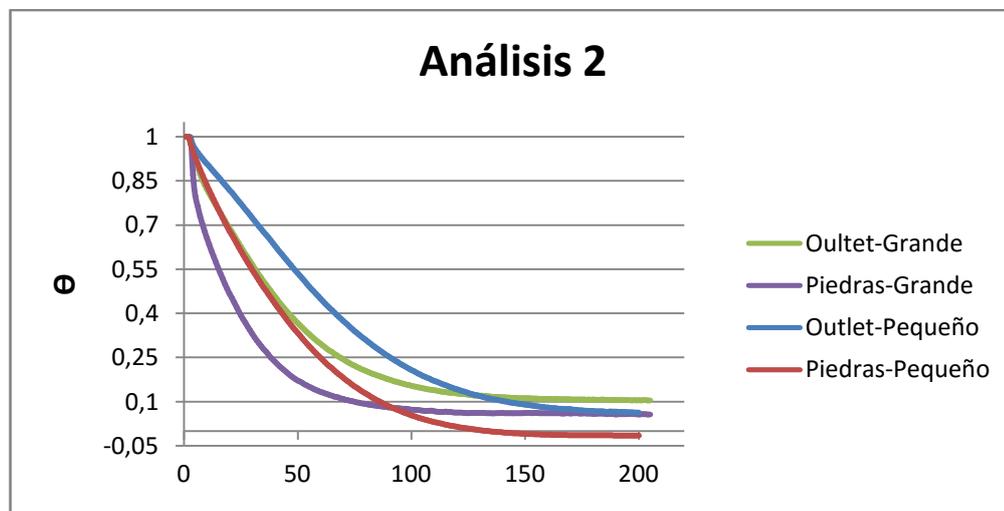
III.2.2 Análisis 2: T=35 °C N.C.: 3.

Nuevamente se muestran los resultados existentes al comparar ambos tamaños, teniendo en cuenta las gráficas del anterior capítulo II (ver figura II.18 y II.23).

De la misma manera se procede a mostrar una comparación del flujo de calor existente hasta alcanzar el equilibrio para una temperatura de 35 °C y un nivel de caudal 3, como hemos dicho anteriormente, corresponde a un caudal de 600 m³/h aprox.

Tabla III.3 Relación de caudales y pérdida de carga 2.

		ΔP (Pa)	\dot{V} (m ³ /h)
Tamaño Grande	Entrada	57	574,77
	Piedras	183	516,76
	Salida	42	500,10
Tamaño Pequeño	Entrada	63	604,26
	Piedras	185	556,3
	Salida	39	481,93

Figura III.2 Relación flujo de calor para $T=35^{\circ}\text{C N.C.}:3$.

Se aprecia en la figura III.2 como la relación Θ de flujo de calor disminuye por debajo de cero, esto puede ser debido a las distintas precisiones de las sondas utilizadas, ya que de otra manera no sería posible.

Para intervalos de temperatura más pequeños podemos apreciar diferencia, en el tiempo en el que se produce el intercambio de energía aire-piedra, luego para un tamaño de piedra mayor, dicho intercambio se produce en un tiempo menor, mostrando que las piedras son capaces de acumular con mayor velocidad la energía que pierde el aire a su paso por el sistema, luego este se enfría con mayor facilidad en comparación a un sistema de tamaño pequeño como se aprecia en la figura III.2.

Ya que cada unidad en el eje de abscisas corresponde a un intervalo de tiempo de 18 s., se puede apreciar una diferencia de 15 min. aprox. hasta que la temperatura de las piedras de tamaño pequeño alcanza el equilibrio al igual que las de tamaño grande.

III.2.3 Análisis 3: T=30 °C N.C.: 3.

Se muestra una última temperatura de 30 °C para este nivel de caudal, con el fin de evaluar diferentes rangos de temperatura y ver su comportamiento, al igual que los casos anteriores según los datos extraídos de la figura II.19 y II.24 en este caso.

Tabla III.4 Relación de caudales y pérdida de carga 3.

		ΔP (Pa)	\dot{V} (m ³ /h)
Tamaño Grande	Entrada	58,5	582,30
	Piedras	193	530,7
	Salida	42	500,10
Tamaño Pequeño	Entrada	62	599,45
	Piedras	187	559,3
	Salida	40	494,13

En la tabla III.4 se pueden ver de igual manera las pérdidas de carga tomadas en el ensayo y sus consecuentes caudales, igualmente existe un caudal de fuga y también se puede apreciar que las pérdidas de carga aproximadamente se mantienen.

A continuación se muestra la relación de flujo de calor para este incremento de temperatura en comparación de ambos tamaños.

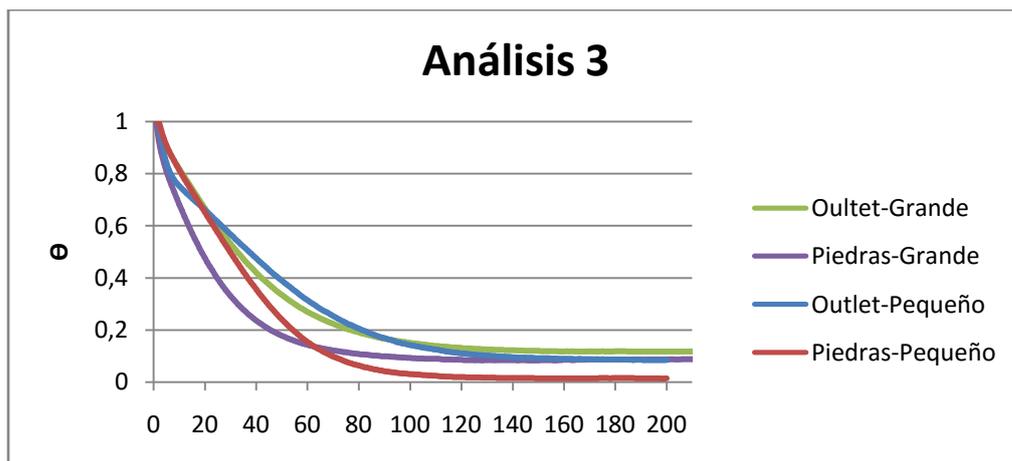


Figura III.3 Relación flujo de calor para T=30°C N.C.:3

Para este incremento de temperatura, también se observa una diferencia en el alcance del tiempo de equilibrio para los dos sistemas, siendo igual que en el anterior, en un tiempo menor para el sistema de piedras de tamaño grande.

En este caso la diferencia de tiempo corresponde a 6 min. aproximadamente, teniendo en cuenta que al caudal definido por la UTA en el sistema de piedras de tamaño pequeño le corresponde un valor un tanto mayor, luego eso provoca un adelantamiento en el alcance de dicho equilibrio, esto quiere decir, que para un valor idéntico entre ambos, la diferencia de tiempo sería mayor, al igual que en el caso anterior.

III.2.4 Análisis 4: $T=40$ °C, N.C.: 1.

Se va a realizar el análisis para el nivel de caudal menor, en otro incremento de temperatura diferente, se ha calculado para este caso el caudal como en los casos anteriores dando lugar a un valor de referencia para este nivel de 350 m³/h aproximadamente.

Tabla III.5 Relación de caudales y pérdida de carga 4.

		ΔP (Pa)	\dot{V} (m ³ /h)
Tamaño Grande	Entrada	21	348,87
	Piedras	69	316,48
	Salida	15	298,87
Tamaño Pequeño	Entrada	24	372,96
	Piedras	72	347,05
	Salida	16	303,82

El caudal de fuga que se obtiene ahora es considerablemente menor, al disminuir el caudal que circula por el sistema, lógicamente las pérdidas de carga son menores, ya que al disminuir el caudal para una misma sección, se disminuye la velocidad y por consiguiente la variación de presión.

Comparando nuevamente, según los datos de las figuras II.20 y II.25, el flujo de calor en relación al máximo (ver figura III.4) se observa como para incrementos medios de temperatura, entre 10 y 20 °C el intercambio de energía aire-piedra es mayor para los sistemas de piedras grandes, a diferencia de los casos anteriores, el tiempo en alcanzar un valor estacionario para ambos sistemas ha aumentado, así como la separación entre un sistema y otro debido a la disminución de caudal.

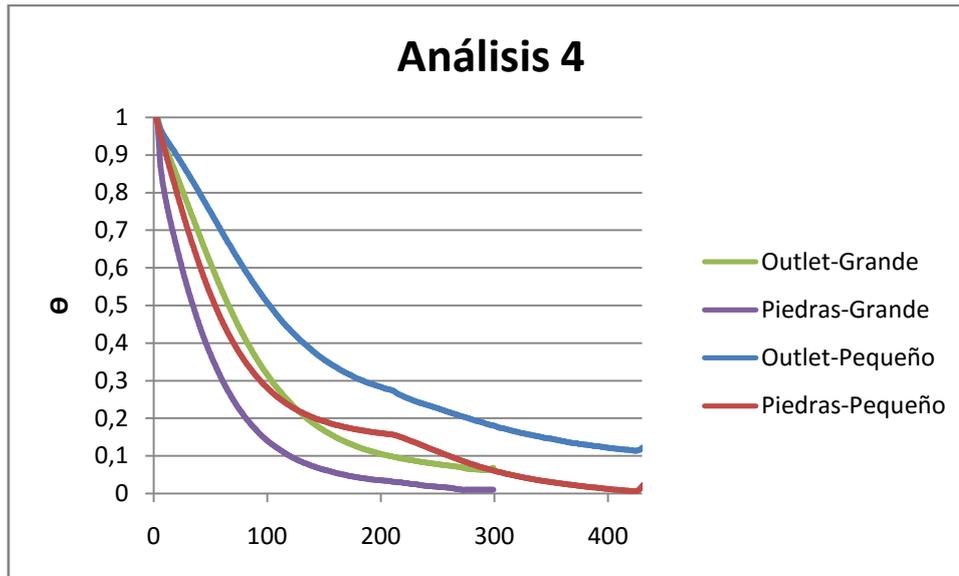


Figura III.4 Relación flujo de calor para $T=40^{\circ}\text{C}$ N.C.:1.

III.2.5 Análisis 5: $T=25^{\circ}\text{C}$. N.C.: 1

Por último se va a analizar el menor incremento de temperatura ensayado para este nivel de caudal (ver figura II.21 y II.26). Nuevamente se aprecia que los incrementos de temperatura no afectan a la pérdida de carga, ya que son prácticamente similares entre ellos, para un valor de nivel de caudal fijado.

En este caso, se ha conseguido un caudal muy similar (ver tabla III.6) para ambos tamaños y se puede apreciar como efectivamente, la pérdida de carga es mayor para un sistema de piedras de tamaño grande como se demostró anteriormente, obteniendo la constante característica K de ambos sistemas.

Tabla III.6 Relación de caudales y pérdida de carga 5.

		ΔP (Pa)	\dot{V} (m ³ /h)
Tamaño Grande	Entrada	21,5	354,37
	Piedras	75	330,82
	Salida	16	308,68
Tamaño Pequeño	Entrada	20	340,46
	Piedras	63	324,64
	Salida	14,5	293,85

Para este análisis se puede comprobar que analizando la energía intercambiada aire-piedra (ver figura III.5) no se aprecian grandes diferencias en el alcance de un valor estacionario para ambos sistemas, luego para

incrementos de temperatura pequeños el intercambio de energía aire-piedra se produce en el mismo tiempo para los dos tamaños.

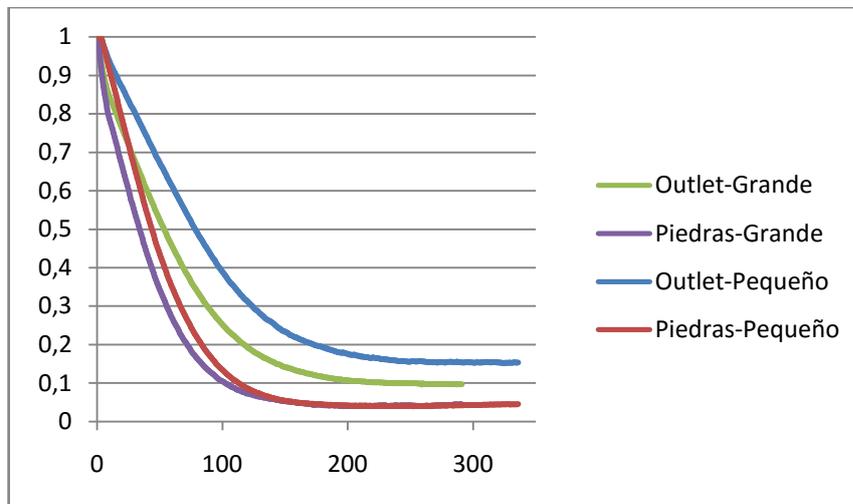


Figura III.5 Relación flujo de calor para $T=25^{\circ}\text{C}$ N.C.:1

Una vez analizados los datos y viendo la influencia de los tamaños y las temperaturas en el sistema de acumulación de energía se procede a analizar la implantación de una aplicación de diferentes maneras que muestre el ahorro energético producido por este sistema, y la viabilidad de implantarlo de forma real.

Para ello, en los siguientes epígrafes se muestran todos aquellos datos necesarios así como los cálculos tomados para el dimensionamiento y requerimiento del sistema de acumulación mediante piedras.

III.3 Cálculo de cargas térmicas

Para calcular la demanda térmica en el interior de la vivienda es necesario realizar el cálculo de las cargas térmicas, que quedaron definidas en el apartado I.6, detallando su cálculo a continuación, así como la selección de un ventilador apropiado con el fin de conseguir un flujo de aire adecuado hacia el interior de la vivienda que lleve la energía procedente de las piedras para administrar el ahorro energético.

III.3.1 Cálculo de cargas térmicas de calefacción

Como anteriormente se ha definido la carga térmica de calefacción es la potencia máxima de calentamiento necesaria para cerrar el balance de las pérdidas a través de los cerramientos y ventilación.

Normalmente se realiza un procedimiento estimativo, el más habitual solo tiene en cuenta:

- La transmisión por las paredes: se produce al tener dos lugares a diferente temperatura, se va a tener un proceso de transmisión de calor del habitáculo a mayor temperatura al de menor temperatura definido por la ecuación siguiente.

$$Q_{trans} = U_m \cdot A \cdot (T_{int} - T_{amb}) \quad (E-III.2)$$

Siendo:

$$U_m = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum^j \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (E-III.3)$$

- Pérdidas por ventilación: parte del aire a mayor temperatura, al ser más liviano asciende, de esta manera, se mezclará con el de ventilación y se perderá dicha energía térmica.
- Por ventilación e infiltraciones: son las debidas a la renovación del aire del interior y el que entra a través de los intersticios respectivamente por ventilación natural o forzada. Como anteriormente quedo definido, se puede distinguir entre carga sensible y carga latente.

Siendo:

$$Q_{vent \rightarrow sens} = V_{air} \rho_{air} C_{p_{air}} (T_m - T_{amb}) \quad (E-III.4)$$

$$Q_{vent \rightarrow lat} = V_{air} \rho_{air} h_{fg} (w_{int} - w_{ext}) \quad (E-III.5)$$

Las ganancias de calor por personas, motores, etc., como se ha dicho anteriormente no se consideran porque reducen la demanda de energía punta. Aunque siempre se realiza para las condiciones más desfavorables, y en el caso de que existan cargas internas se reducirá el consumo de calefacción.

III.3.2 Cálculo de cargas térmicas de refrigeración

El procedimiento es similar al descrito anteriormente para las cargas de calefacción, siendo para esta la potencia máxima de enfriamiento necesaria para vencer todas las ganancias de calor existentes. A diferencia del anterior, para las cargas térmicas de refrigeración es necesario tener en cuenta todas

las contribuciones, por lo que cabe añadir las ganancias de radiación y las cargas térmicas internas.

- Cargas térmicas de radiación es la carga sensible debida al paso de la radiación solar a través de superficies acristaladas. Depende de la posición solar, orientación (or) de las ventanas, transmitancia de los cristales, etc., y se define a través de la siguiente expresión:

$$Q_{rad} = \sum_{or} I_{or} \cdot A_{or} \cdot f_c \quad (E-III.6)$$

- Cargas térmicas internas: Dependen del uso del edificio, es normalmente debido a máquinas iluminación y diferentes equipos de uso así como de la presencia de personas que afectan al grado de ocupación. Estas son consideradas habitualmente como ganancias instantáneas. También pueden ser cargas sensibles o latentes.

III.4 Condiciones de cálculo

III.4.1 Características de la vivienda.

Se va a determinar el cálculo de este sistema de acumulación de energía para una vivienda de 50 m² en el que se va instalar el sistema de refrigeración para un habitáculo de 20 m² y 2,5 metros de altura, con cerramientos en los que existirá la transmisión de calor del exterior hacia el interior cuando se requiera el uso de este sistema.

Las características de los cerramientos serán las siguientes:

1. Un muro de ladrillo hueco de 6 m. de largo por 2.5 m. de alto cubierto de yeso. En el muro existe una ventana de vidrio por la que inciden los rayos solares de 3 m² y 0,02 m. de espesor.
2. Un techo de ladrillo hueco de 20 m² cubierto de yeso interior y cemento.

El muro de ladrillo hueco tiene un espesor de 0,12 m. con recubrimiento de yeso de 0.015 m. a ambos lados y un coeficiente de transmisión de calor K de 0.49 y 0.26 W/m²°C respectivamente según la tabla III.7

El techo de ladrillo hueco tiene un espesor de 0,25 m. y un recubrimiento de yeso interior y cemento de 0,01 m.

Tabla III.7 Coeficiente conductividad térmica. Fuente: Catálogo de Elementos Constructivos del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

Material	Conductividad térmica [W/(m·K)]
Metales	35 (plomo) 381 (cobre)
Hormigón	1,63 - 2,74
Agua	0,60 (líquida) - 2,50 (hielo)
Mortero de cemento	0,35 - 1,40
Ladrillo macizo	0,72 - 0,90
Bloques de hormigón	0,35 - 0,79
Ladrillo hueco	0,49 - 0,76
Enlucidos de yeso	0,26 - 0,30
Ladrillo multialveolar	0,20 - 0,30
Maderas, tableros	0,10 - 0,21
Hormigón celular	0,09 - 0,18
Aislamientos	0,026 - 0,050
Aires (sin convección)	0,026

Los datos anteriores son necesarios para el cálculo de las resistencias debidas al calor transmitido hacia el interior por conducción para determinar de esta manera la parte del coeficiente global de transmisión de calor U_m definido en la ecuación (E-III.3) debidas a esta transmisión de calor.

Para el cálculo de las resistencias relacionadas con el coeficiente de película y debidas al calor transmitido por convección, se obtienen según norma NBE CT-79 [N-8] a partir de la tabla III.8

Tabla III.8 Resistencias térmicas debidas al calor transmitido por convección. Fuente: Norma NBE CT-79 [N-8].

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor	Situación del cerramiento	Situación del cerramiento					
		De separación con espacio exterior o local abierto			De separación con otro local, desván o cámara de aire		
		$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal $> 60^\circ$ y flujo horizontal		0,13 (0,11)	0,07 (0,06)	0,20 (0,17)	0,13 (0,11)	0,13 (0,11)	0,26 (0,22)
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal $\leq 60^\circ$ y flujo ascendente		0,11 (0,09)	0,06 (0,05)	0,17 (0,14)	0,11 (0,09)	0,11 (0,09)	0,22 (0,18)
Cerramientos horizontales y flujo descendente		0,20 (0,17)	0,06 (0,05)	0,26 (0,22)	0,20 (0,17)	0,20 (0,17)	0,40 (0,34)

Resistencias térmicas superficiales en $m^2 \text{ h } ^\circ\text{C/kcal}$ ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

Con los datos anteriores y según la E-III.3 se establece:

1. Un coeficiente de transmisión de calor global U_m constante y de valor $U_m = 1,885 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para el cerramiento vertical.
2. Un coeficiente de transmisión de calor global $U_m = 1,291 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para el cerramiento horizontal.
3. Por último, un coeficiente de transmisión global $U_m = 5,202 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para la ventana.

III.4.2 Condiciones interiores de confort

Se establece la ocupación de dicho habitáculo por un número medio de 2 personas, las cuales emitirán una cantidad de calor latente y sensible según la ocupación de éstas, definido por la siguiente tabla III.9:

ACTIVIDAD REALIZADA	28 °C		27 °C		26 °C		24 °C	
	Sensible	Latente	Sensible	Latente	Sensible	Latente	Sensible	Latente
Sentado en reposo. Escuela.	45	45	50	40	55	35	60	30
Sentado trabajo ligero. Instituto.	45	55	50	50	55	45	60	40
Oficinista, actividad ligera.	45	70	50	65	55	60	60	50
Persona de pie. Tienda.	45	70	50	75	55	70	65	60
Persona que pasea. Banco.	45	80	50	75	55	70	65	60
Trabajo sedentario.	50	90	55	85	60	80	70	70
Trabajo ligero taller.	50	140	55	135	60	130	75	115
Persona que camina.	55	160	60	155	70	145	85	130
Persona que baila.	70	185	75	175	85	170	95	155
Persona en trabajo penoso.	115	250	120	250	125	245	130	230

Tabla III.9 Calor latente y sensible en vatios desprendido por persona. Fuente: www.ingmecanica.com [W-7].

El RITE, en su instrucción 02.2.1 hace referencia a la norma *UNE EN ISO 7730* [N-7]. y la resume en la tabla siguiente, que fija las condiciones de las zonas ocupadas:

Tabla III.10 Condiciones interiores de diseño. Fuente: Norma *UNE EN ISO 7730*.

Estación	Temperatura operativa °C	Velocidad media del aire m/s	Humedad relativa %
Verano	23 a 25	0,18 a 0,24	40 a 60
Invierno	20 a 23	0,15 a 0,20	40 a 60

No existen equipos de iluminación dentro del espacio que emitan calor ya que no es necesario luz adicional durante el día.

Por tanto, a modo resumen se puede determinar a través del siguiente cuadro los flujos de calor necesarios en el local para régimen estacionario.

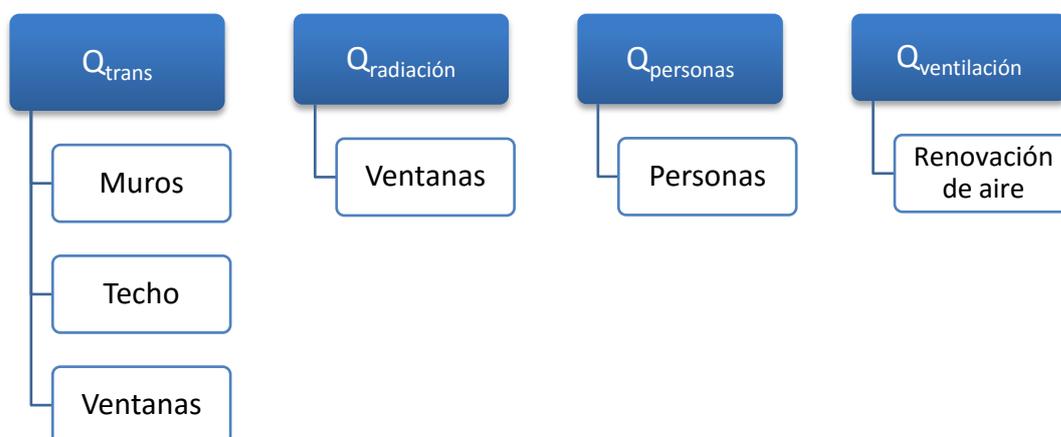


Figura III.6 Flujo de calor para régimen estacionario en un espacio interior.

III.5 Cálculo del sistema de acumulación

Como se ha mostrado en la tabla III.10, la temperatura de confort establecida para la vivienda será de 23 °C y una humedad del 45% para la estación de verano-otoño.

Se toma como dato para realizar el estudio, un día procedente del año meteorológico tipo en el que la temperatura mínima sea lo suficientemente baja para el enfriamiento del sistema durante la noche y aprovechar esa energía para la posterior refrigeración durante el día, hasta que la temperatura alcanzada por el aire a la salida de las piedras sea mayor a la temperatura fijada de confort en el interior de la vivienda. Será en ese momento cuando se pare el sistema de ventilación hacia el interior, pues deja de tener sentido introducir aire, cuando la temperatura de éste es mayor que la temperatura de referencia.

Este valor corresponde al día 46 del año con una diferencia de temperatura máxima de 16,6 °C siendo $T_{max} = 29,4$ °C y $T_{min} = 12,8$ °C.

El tamaño de las piedras seleccionado corresponderá a piedras de un tamaño medio ($D=50$ mm.) ya que se ha mostrado en los análisis que el uso de un tamaño grande da lugar a un intercambio de energía aire-piedra mayor, pero las pérdidas de carga también aumentan, luego es conveniente una compensación.

III.5.1 Cálculo por sobredimensionamiento del sistema 1.

El sistema de acumulación se puede diseñar de diferentes maneras, la más sencilla es sobredimensionar el sistema, no teniendo en cuenta las demandas energéticas de la vivienda para cada instante, si no calculando la carga térmica en relación a la máxima temperatura ambiente y la de confort de la vivienda. Por tanto, se requiere el cálculo para la mayor carga térmica de la misma cumpliendo con las condiciones antes descritas.

La demanda energética máxima será aquella obtenida a partir de la suma del calor transmitido por las cargas térmicas antes mencionadas teniendo en cuenta la diferencia de temperaturas entre la máxima ambiente y la interior asignada en la vivienda y el tiempo que se mantenga esa variación máxima.

Siendo para el calor transmitido a través de los cerramientos:

$$Q_{trans} = Q_{muro} + Q_{techo} + Q_{vent} \quad (E-III.7)$$

El calor transmitido debido a las renovaciones del aire tiene en cuenta el volumen de aire ocupado en la habitación, para este caso, se trata del volumen total del habitáculo siendo $V_{hab} = 30 \text{ m}^3$ y la densidad del aire como indica la ecuación E-III.4.

La densidad del aire depende de la temperatura, para el caso reflejado se puede determinar a través de la ecuación E-III.8, conociendo el valor de la constante del aire $R_{air} = 287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ según [9, Crespo, 2006], presión y temperatura.

$$\rho = \frac{P}{R_{air} T} \quad (E-III.8)$$

El calor transmitido debido a las renovaciones de aire de forma latente, tiene en cuenta la diferencia de humedad entre el exterior y el interior siendo ésta con una variación del 15%.

El calor que atraviesa las ventanas por radiación depende de la irradiancia según la orientación como se indica en la ecuación E-III.6 y el área de la ventana aplicando un factor de corrección debido al material de la misma, según [11, Miranda A.L., 2007] se puede obtener el calor transmitido por radiación.

Tabla III.11 Cargas térmicas de refrigeración.

Cargas térmicas	W
$\sum Q_{trans}$	416,01
$Q_{vent \rightarrow sens}$	107,36
$Q_{vent \rightarrow lat}$	12,2
$Q_{personas}$	180
Q_{rad}	1.286,22
Total	2.001,79

Con estos valores se podría obtener la masa de piedras necesaria, teniendo en cuenta la igualdad de la ecuación E-III.9 y balances energéticos que relacionan las cargas térmicas anteriores y la energía que son capaces de suministrar las piedras hasta el instante requerido.

$$E = M_{piedras} \cdot C_{p_{piedras}} \cdot \Delta T_{piedras \rightarrow min} \quad (E- III.9)$$

Siendo $T_{piedras}$, la temperatura a la que se encuentran las piedras en ese instante. El valor máximo de esta temperatura será de 23 °C, la temperatura interior de confort en la vivienda, la cual no tiene sentido alcanzar porque el interior se estaría calentando, obteniendo en el interior una temperatura por encima del valor de confort.

Por tanto, como se está sobredimensionando el sistema se suponen solo dos instantes de tiempo, uno inicial en el que la temperatura de las piedras será la mínima de 12,8 °C y uno final con una temperatura fija de 20 °C a la que se han calentado las piedras a su paso por el aire, y por consiguiente, la misma temperatura que tendrá éste a la entrada del local (T_{ent}) una vez alcanzando el nivel estacionario definiendo una eficiencia $\varepsilon = 1$.

$$\varepsilon = \frac{T_{ext} - T_{ent}}{T_{ext} - T_{piedras}} \quad (E- III.10)$$

Para calcular la masa de piedras, se realiza mediante balances energéticos teniendo en cuenta además la carga térmica en la vivienda. Primeramente se calcula el caudal de aire requerido por el sistema (ver E-III.11) para conseguir los valores de temperatura citados anteriormente.

$$Q_{térmica} = \dot{V}_{aire} \cdot \rho_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot (T_{int} - T_{ent}) \quad (E- III.11)$$

Si se realiza el balance energético entre el aire y las piedras, el calor que pierde el aire será igual al que ganen las piedras, luego a través de la ecuación E-III-12.

$$Q_{piedras} = \dot{V}_{aire} \cdot \rho_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot (T_{ext} - T_{ent}) \quad (E- III.12)$$

Como se puede ver en la tabla AII.1 del Anexo II que recoge la temperatura seca por hora del día escogido, el tiempo que se requiere cubrir por el sistema es de 10 horas, desde que aumenta la temperatura ambiente por encima de la de confort hasta que desciende nuevamente.

En la tabla III.12 se muestran los resultados obtenidos a partir de los balances energéticos anteriores y el resto de ecuaciones.

Tabla III.12 Resultados de caudal y potencia en sobredimensionamiento 1.

$\dot{V}_{aire}(\text{m}^3/\text{h})$	$Q_{piedras}(\text{KJ}/\text{h})$
1.988,86	22.434,36

Por último, una vez obtenido el valor $Q_{piedras}$ se puede calcular la masa de éstas según la ecuación E-III.9, igualando el valor anterior por el tiempo de utilización del sistema, ya que queremos obtener la energía.

$$M_{piedras} = \frac{22.434,36 \text{ KJ}/\text{h} \cdot 10 \text{ h}}{0,750 \text{ KJ}/\text{Kg}^\circ\text{C} \cdot (23 - 20)^\circ\text{C}} = 41.545,13 \text{ Kg}$$

La masa obtenida es muy alta, luego el paso de aire por el sistema dará lugar a una pérdidas de carga elevadas, eso provoca un gran consumo del ventilador ya que la potencia de éste es proporcional al caudal de aire y las pérdidas de carga.

III.5.2 Cálculo por sobredimensionamiento del sistema 2.

Existe otra forma más real de sobredimensionar el sistema, implantando una masa de piedras definida como dato en el diseño de éste, estableciendo dicha masa con el fin de cumplir las condiciones requeridas del diseño en relación a las temperaturas, por tanto, de la misma manera que el anterior, se trata conseguir que la temperatura de las piedras no alcancen la temperatura de confort del interior.

Se va a tener en cuenta la carga térmica de la vivienda calculada en el caso anterior, ya que de igual forma se está sobredimensionando el sistema, a diferencia de la primera aplicación, en el actual sistema se calculará la

temperatura a la que evolucionan las piedras, hora a hora, en función de la temperatura a la que aumenta el aire ambiente y utilizando las mismas ecuaciones (E-III.9, E-III.10 y E-III.11). En este proceso, la temperatura mínima (T_{\min}) de las piedras corresponderá a la inicial en el primer instante e irá aumentando cada hora.

Se toman los datos de cada hora a partir del año meteorológico tipo (ver tabla All.1), comenzando cuando la temperatura ambiente es mayor a la temperatura de confort, entendiéndose así la necesidad de refrigerar el habitáculo.

El caudal impulsado se modifica en función de las condiciones requeridas, por lo que a partir de las ecuaciones obtenemos los resultados siguientes, para una masa de piedras de 16.500 Kg. y una temperatura mínima inicial $T_{\text{ent}}=T_{\text{piedras}}=12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ya que la eficiencia es igual a 1.

Tabla III.13 Resultados de caudal, T° y potencia en sobredimensionamiento 2.

Hora	T (°C)	$Q_{\text{térmica}}(W)$	$\dot{V}_{\text{aire}}(m^3/h)$	$Q_{\text{piedras}}(KJ/h)$	$T_{\text{piedras}}(^{\circ}\text{C})$
11:00	23,05	2.001,79	584,96	7.195,00	13,38
12:00	25,60	2.001,79	620,32	9.095,30	14,12
13:00	27,50	2.001,79	671,64	10.786,76	14,99
14:00	28,75	2.001,79	744,71	12.298,41	15,98
15:00	29,40	2.001,79	850,17	13.689,18	17,09
16:00	29,25	2.001,79	1.009,24	14.729,22	18,28
17:00	28,20	2.001,79	1.263,65	15.045,08	19,49
18:00	26,40	2.001,79	1.701,85	14.103,45	20,63
19:00	24,80	2.001,79	2.521,52	12.606,38	21,65
20:00	23,80	2.001,79	4.427,65	11.410,45	22,57

Al disminuir la masa de las piedras, las pérdidas de carga también se reducirán y con ello la potencia del ventilador.

Al calcular el caudal requerido de aire por hora se observa que ha disminuido en relación al caso anterior, solo supera su valor en las dos últimas hora ya que la temperatura de las piedras es cercana a la de confort luego se requiere aumentar excesivamente ese caudal para poder refrigerar el local, con la energía disponible.

III.5.3 Cálculo por demanda horaria

Nuevamente se realiza un cálculo sin la necesidad de estar desperdiciando energía, cumpliendo con los requisitos de ahorro y mejorando así el coste económico del sistema, favoreciendo también a un uso eficiente de la

energía, si se calcula la demanda energética que se requiere por cada hora, para aportar en este caso, lo requerido.

Los datos meteorológicos tomados para cada hora son los mismos que los tomados en el caso anterior de sobredimensionamiento 2 ya que se elige el mismo día para observar las diferencias entre los tres supuestos.

El procedimiento de enfriamiento de las piedras se realiza de la misma forma para conseguir la temperatura mínima del día.

Se va a asumir que la temperatura se mantiene durante cada hora, para poder aplicar a partir de la potencia requerida, la cantidad de energía que es necesario aportar.

Tabla III.14 Potencia requerida por hora.

Hora	T (°C)	$Q_{vent+muro+techo}$	$Q_{vent \rightarrow sens+lat}$	$Q_{pers \rightarrow sens+lat}$	Q_{rad}	$\sum Q_{tot} (W)$
11:00	23,05	3,25	11,82	180	852,32	1.047,39
12:00	25,60	169,02	55,41	180	909,38	1.313,79
13:00	27,50	292,50	87,69	180	1.188,74	1.748,93
14:00	28,75	373,75	108,66	180	1.318,23	1.980,64
15:00	29,40	416,01	119,56	180	1.286,22	2.001,79
16:00	29,25	406,25	117,04	180	1.158,18	1.861,48
17:00	28,20	338,01	99,43	180	840,52	1.457,95
18:00	26,40	221,02	69,03	180	0	470,03
19:00	24,80	117,01	41,785	180	0	338,79
20:00	23,80	52,01	24,60	180	0	256,60

Se aprecia que el punto de máxima potencia demandada corresponde al de los dos casos anteriores cuando la temperatura ambiente es máxima, disminuyendo tanto antes como después a la vez que disminuye la temperatura ambiente y por tanto, las necesidades de calor en el interior de la vivienda.

En la figura III.7 se muestra gráficamente los resultados obtenidos para cada carga térmica coincidiendo a las 15:00 h. el punto de máximo aporte de energía (demanda punta) con la carga térmica máxima.

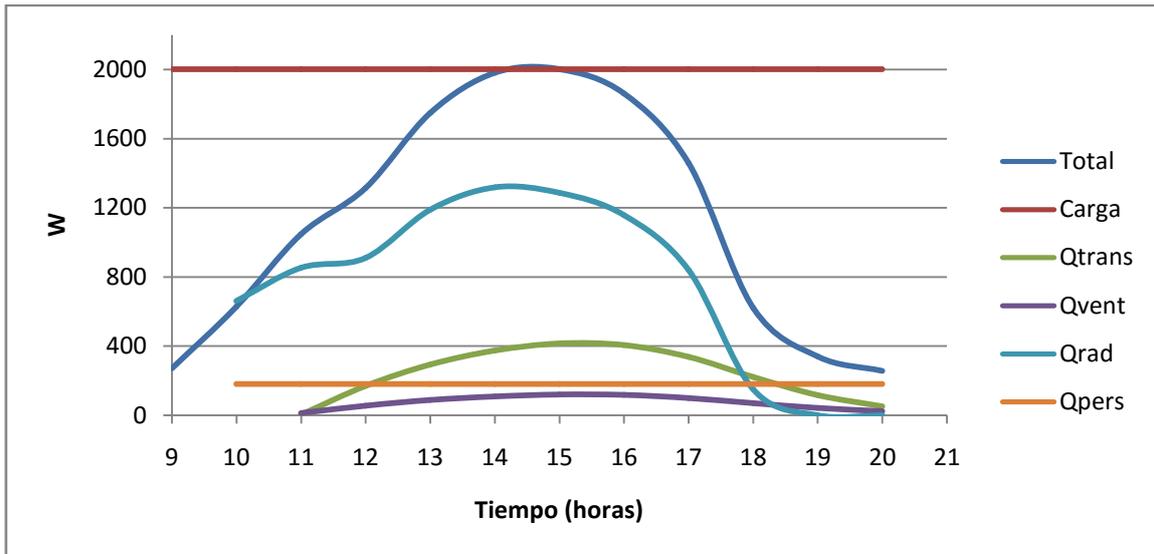


Figura III.7 Energía necesaria de aporte a la vivienda.

Si se realiza un análisis de regresión para determinar el polinomio que mejor se ajusta a la curva, se puede calcular el área bajo la misma a partir de una integral definida para determinar la cantidad de energía que es necesaria aportar durante las 10 horas de aplicación.

Un polinomio de grado 4, es suficiente para el ajuste, ya que obtenemos un $R^2=0,977$, por lo que, según la ecuación E-III.11 se determina la potencia requerida en cualquier punto.

$$Pot(x) = 2,008x^4 - 116x^3 + 2394x^2 - 20776x + 64768 \quad (E- III.13)$$

A partir de una integral definida de la función anterior con sus correctas unidades, determinamos la energía necesaria que es necesario aportar, entre las 11 horas y las 21 horas del día.

$$E = \int_{11}^{21} Pot(x) \quad (E- III.14)$$

Una vez calculado la necesidad energética, se trata de ver cuánta energía nos aporta el sistema de piedras, para ello es necesario calcular la temperatura que van adquiriendo las piedras al paso del tiempo, mientras el aire se va calentando debido al aumento de la temperatura ambiente.

En este tercer caso también se va a determinar el caudal de aire necesario por cada hora, según la energía demandada siendo la masa de las piedras como parte del diseño, una elección que optimice el sistema. La masa será

menor aún que en el primer caso, ya que no queremos realizar el sobredimensionamiento del sistema.

$$M_{\text{piedras}} = 8.650 \text{ Kg.}$$

A partir de la siguiente ecuación E-III.13, mediante un balance energético se puede determinar cómo va aumentando la temperatura T_i de las piedras al paso del aire.

$$M_{\text{piedras}} \cdot C_{p_{\text{pied}}} \cdot (T_i - T_{i-1}) = \dot{V}_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot C_{p_{\text{air}}} \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{ent}}) \cdot \Delta t \quad (\text{E- III.15})$$

Siendo T_{i-1} la temperatura inicial de las piedras en el momento en el que fueron enfriadas con la temperatura mínima de la noche, asumiendo que mantienen la temperatura hasta hacer pasar el aire por ellas, al estar aisladas. De igual manera que en el caso anterior obtenemos los resultados para cada hora de funcionamiento del sistema.

Tabla III.15 Resultados de caudal, T° y potencia por cada hora.

Hora	T (°C)	$Q_{\text{térmica}}(\text{W})$	$\dot{V}_{\text{aire}}(\text{m}^3/\text{h})$	$Q_{\text{piedras}}(\text{KJ}/\text{h})$	$T_i(\text{°C})$
11:00	23,05	1.047,39	306,07	2.823,46	13,24
12:00	25,60	1.313,79	401,02	4.462,71	13,92
13:00	27,50	1.748,93	574,30	7.017,54	15,00
14:00	28,75	1.980,64	738,39	9.134,35	16,41
15:00	29,40	2.001,79	905,78	10.587,23	18,04
16:00	29,25	1.861,48	1.119,69	11.291,81	19,79
17:00	28,20	1.457,95	1.351,79	10.237,44	21,36
18:00	26,40	470,03	1.129,17	5.118,54	22,15
19:00	24,80	338,79	1.191,22	2.838,60	22,59
20:00	23,80	256,60	1.864,80	2.031,01	22,90

Una vez más se observa que al no utilizar un sobredimensionamiento del sistema, obtenemos valores más reducidos de caudal, también al existir un número menor de piedras, las pérdidas de carga volverán a disminuir nuevamente y por consiguiente la potencia requerida por el ventilador para impulsar dicho caudal.

Si se usa la ecuación E-III.9 para cada temperatura, siendo la calculada anteriormente, la temperatura mínima en cada caso, se puede determinar la energía que son capaces de suministrar las piedras por cada hora.

Lógicamente la energía que son capaces de suministrar las piedras irá disminuyendo conforme aumenta su temperatura.

Tabla III.16 Energía aportada por las piedras cada hora.

E_i	E (KJ)
E_{11h}	2.823,46
E_{12h}	4.462,71
E_{13h}	7.017,54
E_{14h}	9.134,35
E_{15h}	10.587,23
E_{16h}	11.291,81
E_{17h}	10.237,44
E_{18h}	5.118,54
E_{19h}	2.838,60
E_{20h}	2.031,01

III.6 Potencia del ventilador

Como bien se ha definido a lo largo de este trabajo la potencia del ventilador es proporcional al caudal impulsado por éste y a las pérdidas de carga del aire al paso por el sistema.

$$\dot{W}_{ventilador} \propto \Delta P \cdot \dot{V} \quad (\text{E- III.16})$$

Por esta razón, la selección de un ventilador tiene que ser la adecuada para que sea capaz de entregar la demanda máxima del sistema en el cual están instalados. Como se ha visto, la demanda varía, pudiendo ser en varios instantes mucho menor que la capacidad de diseño.

Para obtener el punto óptimo de operación existen muchos tipos de ventiladores, un tipo común son aquellos con variadores de frecuencia que logran cambiar la velocidad del ventilador dando lugar a un flujo de aire diferente en cada caso, modificando así la potencia requerida para cada instante.

La selección del punto óptimo se obtiene a través de las curvas del ventilador proporcionadas por el fabricante, siendo éste el punto en el que se cruzan las curvas del ventilador con la curva de la instalación. En el siguiente gráfico (ver figura III.8) se muestra un ejemplo del punto óptimo en función del régimen de giro de un ventilador cualquiera.

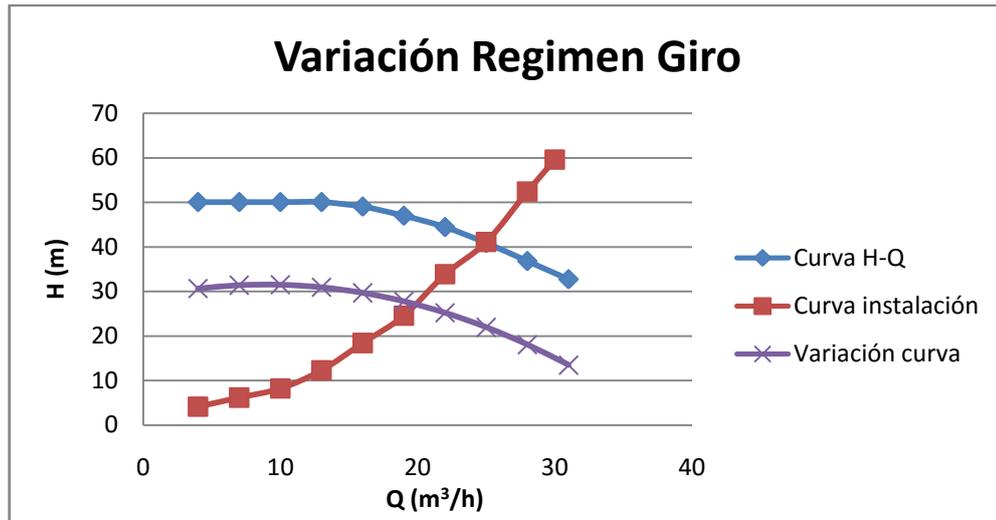


Figura III.8 Curva de funcionamiento de un ventilador. Elaboración propia. Toma de los datos: Laboratorio Mecánica de fluidos de la Universidad de Valladolid.

Si la velocidad se reduce se muestra una disminución significativa de la potencia requerida.

En este caso, el gráfico muestra la relación H-Q, siendo H la altura manométrica y Q el caudal, con una simple relación se podría conocer la diferencia de presión siendo:

$$\Delta P = \rho g H \quad (\text{E- III.17})$$

Volviendo a nuestro sistema de acumulación, se ha estimado la pérdida de carga del sistema, a través de una serie de correlaciones que tienen en cuenta el tamaño de las piedras y las dimensiones del sistema de acumulación.

Ya que se conoce la densidad de las piedras, obtenida en el capítulo II, con un valor de 2.400 Kg/m³ para una masa de piedras de 8.650 Kg. el volumen ocupado por las mismas será de 3,9 m³. El sistema de acumulación se encuentra encerrado en un espacio circular de 0.55 m. de radio y una longitud de 4,10 metros.

Para determinar el ΔP a través del lecho, se ha utilizado la ecuación de Dunkle y Ellul [10, Yüncü Y., 2012]:

$$\Delta P = \frac{L \cdot G_0^2}{\rho_{air} \cdot D_s} \cdot \left(21 + 1750 \cdot \frac{\mu}{G_0 \cdot D_s} \right) \quad (\text{E- III.18})$$

Siendo G_0 el flujo másico del aire dividido por el área frontal del lecho, L la longitud del lecho, μ la viscosidad dinámica del aire y D_s el diámetro equivalente definido por [10, Yüncü Y., 2012]:

$$D_s = \left(\frac{6 \cdot V_s}{n \cdot \pi} \right) \quad (\text{E- III.19})$$

Siendo V_s el volumen total de las n partículas tomadas de forma aleatoria. Se ha tomado un valor $D_s = 0,05 \text{ m}$.

Se obtienen unas pérdidas de presión debido a la circulación del aire a través del lecho de piedras de un valor $\Delta P = 642,69 \text{ Pa}$.

Luego a través de la ecuación E-III.16 se puede estimar la potencia eléctrica necesaria del ventilador tomando el máximo caudal obtenido (ver tabla III.15) con un valor de $1.864,8 \text{ m}^3/\text{h}$ y suponiendo un rendimiento total de la máquina igual a $0,7$ se obtiene que:

$$\dot{W}_{\text{ventilador}} = 570,71 \text{ watt.}$$

Capítulo IV

Conclusiones

En este capítulo se muestran las conclusiones finales derivadas de la realización de los experimentos y sus resultados obtenidos en el capítulo anterior.

IV.1 Influencia del tamaño de piedra y lecho

Como se ha podido observar a lo largo del trabajo se ha utilizado dos tamaños de piedras diferentes uno más grande y otro de menor tamaño, con el fin de evaluar las diferencias existentes entre uno y otro para usar el que mejor se ajuste a los requerimientos exigidos de ahorro energético, energía intercambiada etc.

Primeramente al determinar la constante característica del sistema de piedras K al pasar el aire a través del lecho, se ha observado que en las piedras de mayor tamaño se obtuvo un valor K menor, lo cual, supone una pérdida de carga mayor que en un lecho de piedras de menor tamaño para un valor de caudal fijado, sin embargo, el uso de un lecho de piedras con tamaño mayor ha demostrado un intercambio de calor aire-piedra más grande, esto lleva a pensar que es necesario una compensación entre los tamaños, reduciendo así el coste energético en el aire de impulsión y llegando a satisfacer los requerimientos de energía.

A la hora de escoger una cantidad de piedras para determinar el tamaño del lecho, hay que tener muy en cuenta las pérdidas de carga sufridas al paso del aire por el sistema ya que las pérdidas de carga son proporcionales a la longitud que tiene que atravesar el aire, luego si se utiliza un sobredimensionamiento del sistema como los casos 1 y 2 expuestos en el capítulo III, llevará como consecuencia a un incremento en la potencia del ventilador utilizado, dando lugar a un coste económico innecesario ya que se puede optimizar realizando un estudio exhaustivo de las condiciones interiores del local donde se quiera implantar.

IV.2 Influencia de las temperaturas

Después de varios ensayos realizados, y graficados como se muestran en el capítulo II y III, se ha llegado a la conclusión de que no afecta el valor de la temperatura en sí, si no, el incremento de dicha temperatura, por lo que según los análisis del capítulo III se muestra cómo para incrementos de temperatura pequeños por debajo de 5 °C no hay diferencia en el flujo de calor intercambiado entre aire-piedra en función del tamaño, sin embargo para incrementos medios entre 5-20 °C se muestra que el flujo intercambiado aire-piedra varía en función del tamaño de esta última. En incrementos mayores de 20 °C desaparece de nuevo la diferencia de velocidad en el flujo intercambiado en función del tamaño.

Con respecto a la temperatura ambiente, evidentemente al irse calentando el aire, también las piedras aumentarán su temperatura, llegando a un punto en

el que la capacidad de refrigeración de éstas se reduzca prácticamente a cero, en ello radica la importancia de la elección de unas dimensiones adecuadas que se ajusten a los requerimientos de energía y ahorro energético.

También cabe destacar la importancia de existir un elevado incremento de temperatura entre el día y la noche, por ello, estos sistemas solo son viables en aquellas zonas donde exista dicho incremento, generalmente en zonas desérticas para que sea posible la acumulación de temperatura en el menor tiempo posible.

En el caso de necesitar un descenso más acusado de la temperatura, si existiese una cantidad suficiente de humedad en el aire, se podría realizar la instalación de un sistema de enfriamiento evaporativo combinado para satisfacer las demandas energéticas.

IV.3 Trabajos futuros de interés

Una vez realizado este trabajo, con el fin de evaluar la capacidad de refrigeración, es de gran interés un estudio más profundo acerca de la influencia de los diferentes tamaños en las piedras que lleguen a afectar al intercambio de energía aire-piedra. También se muestra interesante el estudio de la utilización de estos sistemas con el fin de calefactar una vivienda por medio de la acumulación de energía, en diferentes áreas a las desérticas, o en el caso de refrigeración, si fuese necesario algún sistema de apoyo, como el enfriamiento evaporativo, en el caso de que no fuese suficiente el lecho de piedras, atendiendo siempre tanto a un ahorro energético como económico, ya que este punto último también es de vital importancia.

Otro aspecto importante, es la potencia consumida por el ventilador para impulsar el aire. En vez de tomar la energía de la red eléctrica, lo que implica un coste económico, se podría estudiar la impulsión de aire alimentando a través de una placa solar en el techo de la vivienda, analizando su viabilidad energética y económica.

Referencias

Libros y Artículos

- [1] Mastouri, H.; Benhamou, B.; Hamdi, H. "Pebbles Bed Thermal Storage for Heating and Cooling of Buildings". *Energy Procedia* (42) pp.: 761-764. Año 2013.
- [2] Rey Martínez F.J., Velasco Gómez E., "Calidad de ambientes interiores". Editorial Thomson. ISBN 84-9732-540-0. Madrid 2007.
- [3] Rey Martínez F.J., Velasco Gómez E., "Eficiencia energética en edificios". Editorial Thomson. ISBN 84-9732-419-6. Madrid 2006.
- [4] Carnicer Royo E., "Aire Acondicionado". Editorial Paraninfo. 1991.
- [5] Ahuja A., "Integrated mechanical/electrical design: Building Systems Engineering". Editorial Springer. ISBN 978-1-4419-4724-6. 1997.
- [6] United Nations, "World Urbanization Prospects: Highlights. 2014 Revision". ISBN 978-92-1-151517-6. 2014.
- [7] EU Commission, "Indoor air pollution: new EU research reveals higher risks than previously thought". European Commission - IP/03/1278. 2003.
- [8] Raznjevic K., "Handbook of Thermodynamic Tables and Charts". ISBN 0-07-051270-1. Editorial McGraw-Hill Book Company. 1976.
- [9] Crespo A., "Mecánica de fluidos". ISBN 978-84-9732-292-8. Editorial Paraninfo. Madrid, 2006.
- [10] Yüncü H., Paykoc E., Yener Y., "Solar Energy Utilization". ISBN 9789400936317. Editorial Springer Science & Business Media. 2012.
- [11] Miranda A.L., "Técnicas de Climatización". ISBN 84-267-1417-X. Editorial Marcombo. Barcelona, 2007

Normas y Reglamentos

[N-1] *Oficina de vivienda, "CTE, Código Técnico de Edificación", 2008.*

[N-2] *Ministerio de Industria, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y Ministerio de Vivienda de España, "Real Decreto 1027/2007: Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios".*

[N-3] *Norma UNE 171330:2008: Calidad de ambiente en interiores, AENOR, Madrid.*

[N-4] *Norma UNE 100.011 (1991): Climatización. La ventilación para una calidad aceptable del aire en la climatización de los locales, AENOR, Madrid (anulada y sustituida por la UNE-EN 13799 de 2005).*

[N-5] *ASHRAE 62 y 62n (Proposed addendum n), 2001. ANSI/ASHRAE standard 62-2001 (2001): "Ventilation for acceptable indoor air quality", American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.*

[N-6] *CEN 1752 (1996): Technical report CR 1752. Ventilation for buildings: Design criteria for indoor environment. European Committee for Standardisation, European Committee for Standardisation, Brussels.*

[N-7] *UNE EN ISO 7730 (1996): Ambientes Térmicos moderados. Determinación de los límites PMV y PPD y especificaciones de las condiciones de bienestar térmico, AENOR-European Norm, Madrid.*

[N-8] *NBE-CT-79 sobre Condiciones Térmicas en los edificios. Real Decreto 2429/79, 6 de julio 1979. (Derogada por DB-HE: Documento básico de ahorro de energía CTE, Real Decreto 314/2016 de 1996).*

Páginas Web

[W-1] *<http://www.magrama.gob.es/>. Página web del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Día de última consulta: 12 de Diciembre, 2015.*

[W-2] *<http://unfccc.int/>. Página web de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (United Nations, Framework Convention on Climate Change). Día de última consulta: 12 de Diciembre, 2015*

[W-3] <http://www.undp.org/>. *Página web de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Día de última consulta: 13 de Diciembre, 2015*

[W-4] <https://www.minambiente.gov.co/>. *Página web del Ministerio de Medio Ambiente. Día de última consulta: 16 de Diciembre, 2015*

[W-5] <http://www.cdc.gov/>. *Página web de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (Centers for Disease Control and Prevention CDC, USA). Día de última consulta: 18 de Diciembre, 2015.*

[W-6] <http://www.uned.es/cristamine/fichas/cuarzo/cuarzo.htm>. *Página web de la Uned. Día de última consulta: 10 de Enero, 2016.*

[W-7] <http://www.ingmecanica.com/tutorialsemana/tutorialn255.html>. *Página web de tutoriales. Día de última consulta: 7 de Febrero, 2016.*

Anexos

Anexo I: *Relación
completa de
experimentos y
resultados.*

ÍNDICE

AI.1 Resultado de la evolución de temperaturas	115
--	-----

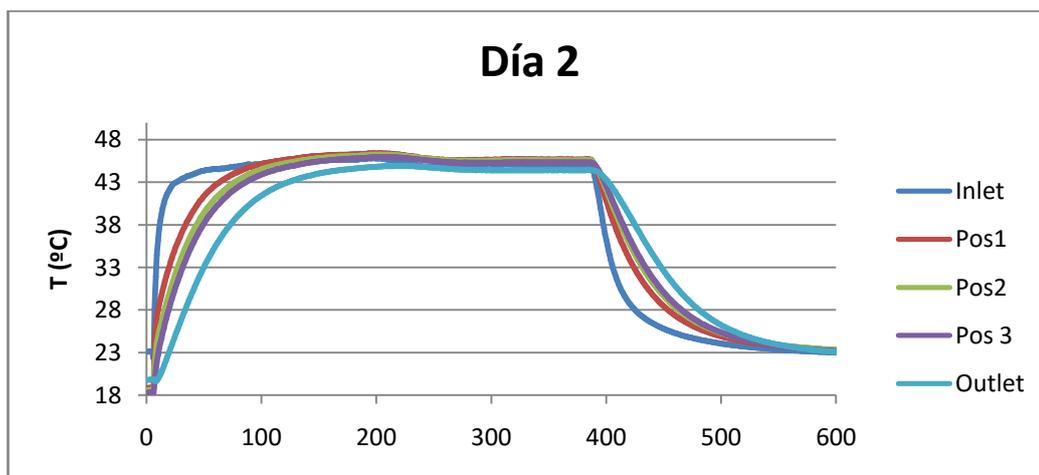
AI.1. Resultados de la evolución de temperatura

- **TAMAÑO GRANDE**

Día 2 (27 de Octubre). N. Caudal: 3. Temperatura: 45 °C.

08:45. Comienzo y arranque de la UTA

11:00. Parada

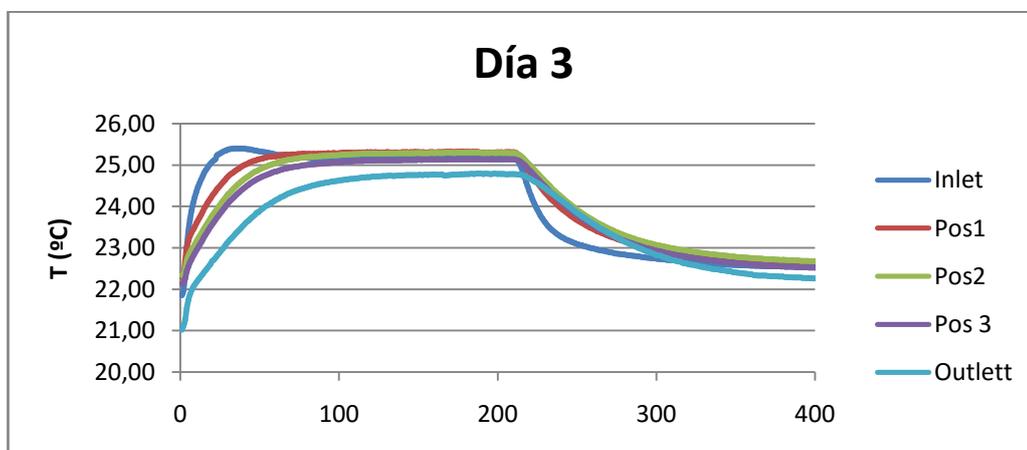


Día 3 (28 de Octubre). N. Caudal: 3. Temperatura: 25 °C.

13:00. Comienzo

14:30. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	60.5	592.15
Salida	43.0	506.01

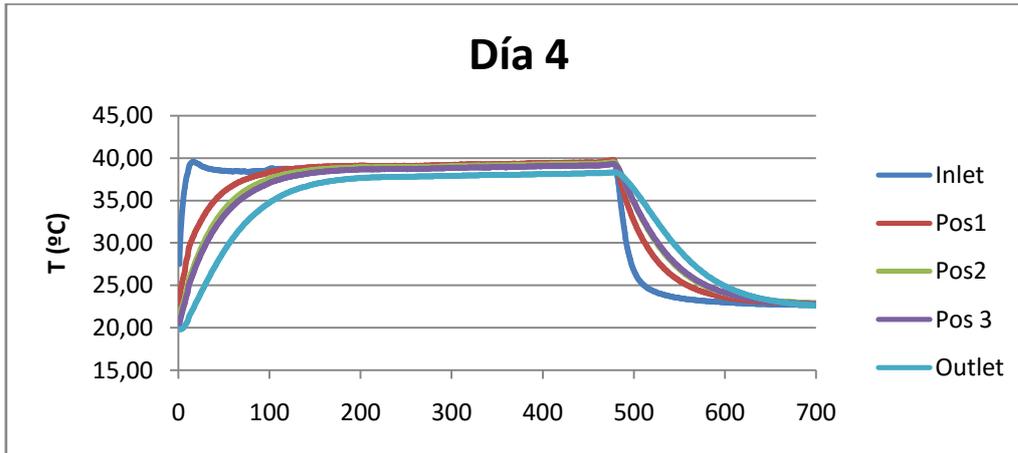


Día 4 (29 de Octubre). N. Caudal: 2. Temperatura: 40 °C.

09:00. Comienzo

10:52. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	29.00	409.97
Salida	20.67	350.82

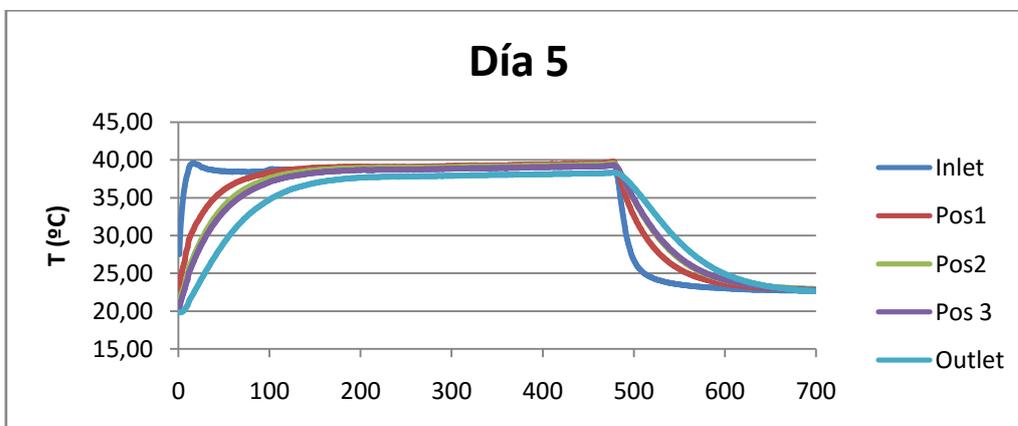


Día 5 (30 de Octubre). N. Caudal: 2. Temperatura: 35 °C.

09:37. Comienzo

11:47. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	29.00	409.97
Salida	20.67	350.82

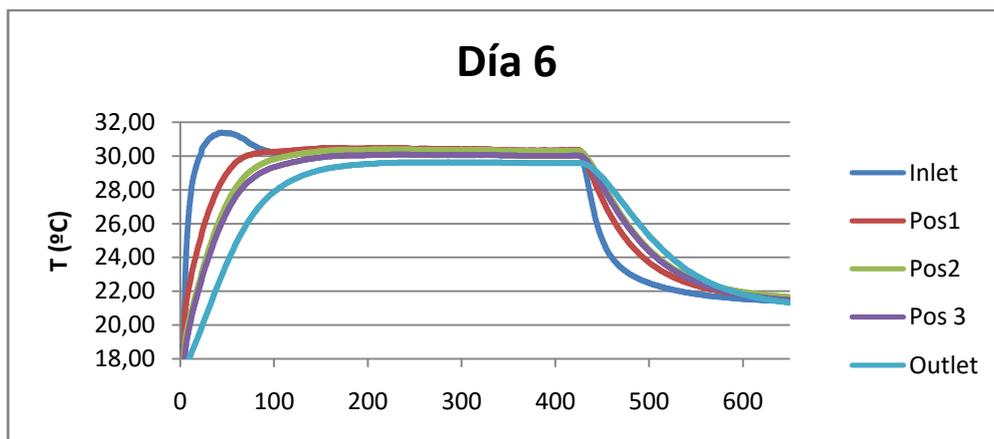


Día 6 (3 de Noviembre). N. Caudal: 2. Temperatura: 30 °C.

08:40. Comienzo

10:45. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	28.00	402.84
Salida	19.33	339.31

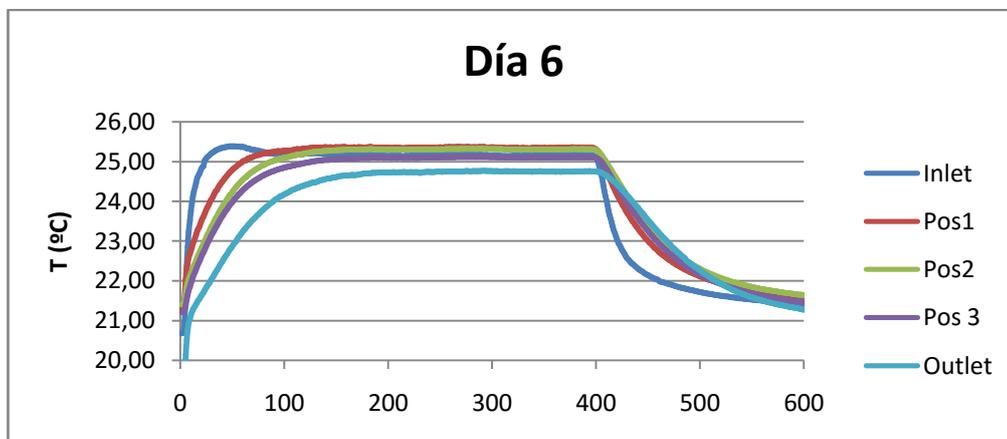


Día 6 (3 de Noviembre). N. Caudal: 2. Temperatura: 25 °C.

12:15. Comienzo

14:19. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	29.00	409.97
Salida	20.67	350.82

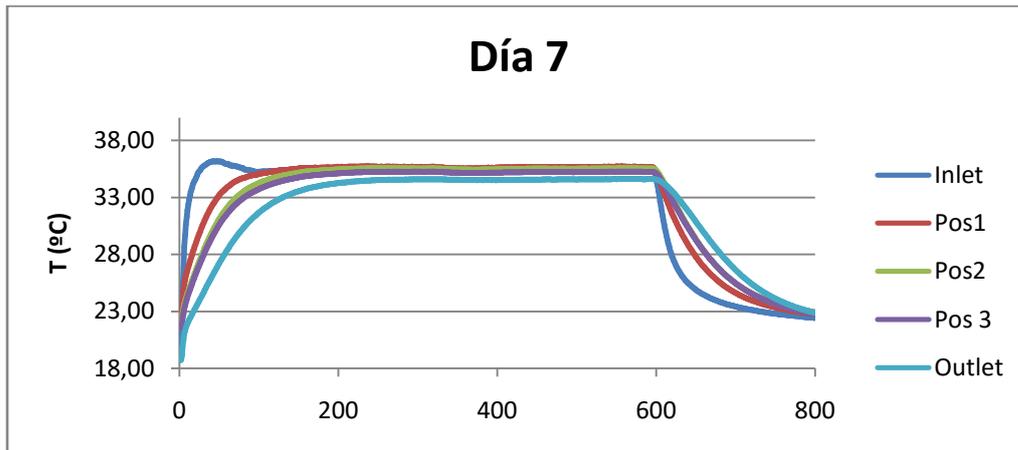


Día 7 (4 de Noviembre). N. Caudal: 1. Temperatura: 35 °C.

13:48. Comienzo

16:38. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	24	372.96
Salida	16	308.68

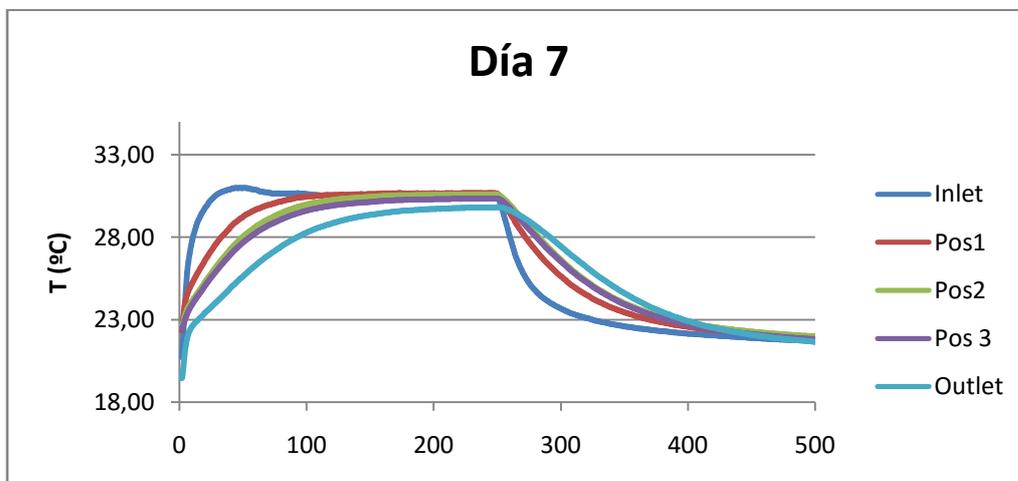


Día 7 (4 de Noviembre). N. Caudal: 1. Temperatura: 30 °C.

18:00. Comienzo

19:20. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	24	372.96
Salida	16	308.68



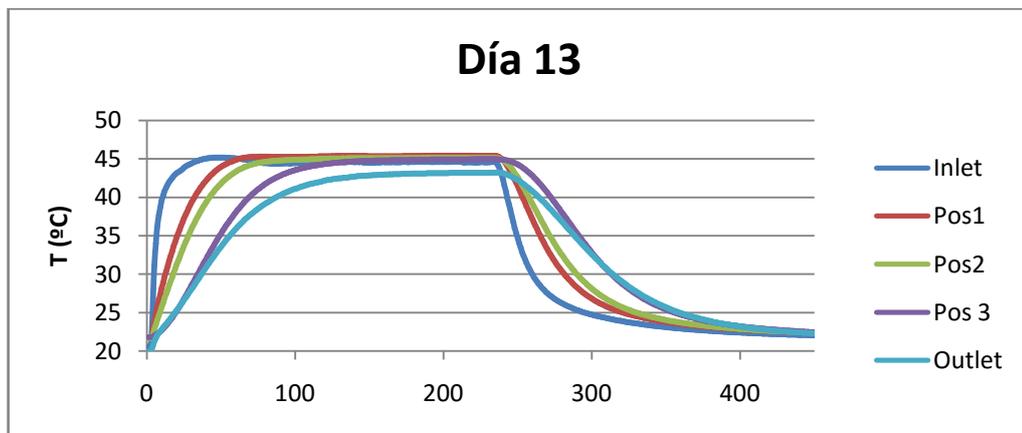
- **TAMAÑO PEQUEÑO**

Día 13 (24 de Noviembre). N. Caudal: 3. Temperatura: 45 °C.

12:25. Comienzo.

13:35. Parada.

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	63.14	604.95
Salida	41.57	497.56

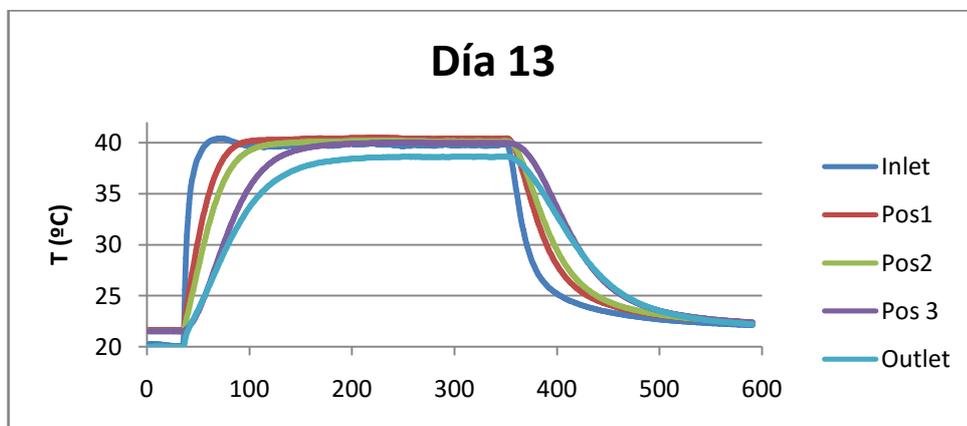


Día 13 (24 de Noviembre). N. Caudal: 3. Temperatura: 40 °C.

17:10. Comienzo

18:40. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	60.22	590.79
Salida	38.56	479.17

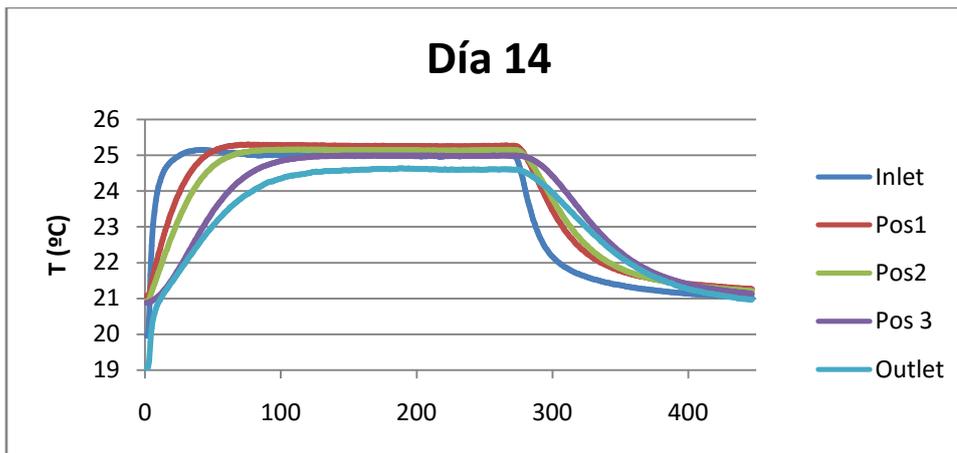


Día 14 (25 de Noviembre). N. Caudal: 3. Temperatura: 25 °C.

16:45. Comienzo

17:10. Parada.

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	62.67	602.66
Salida	39.67	483.03

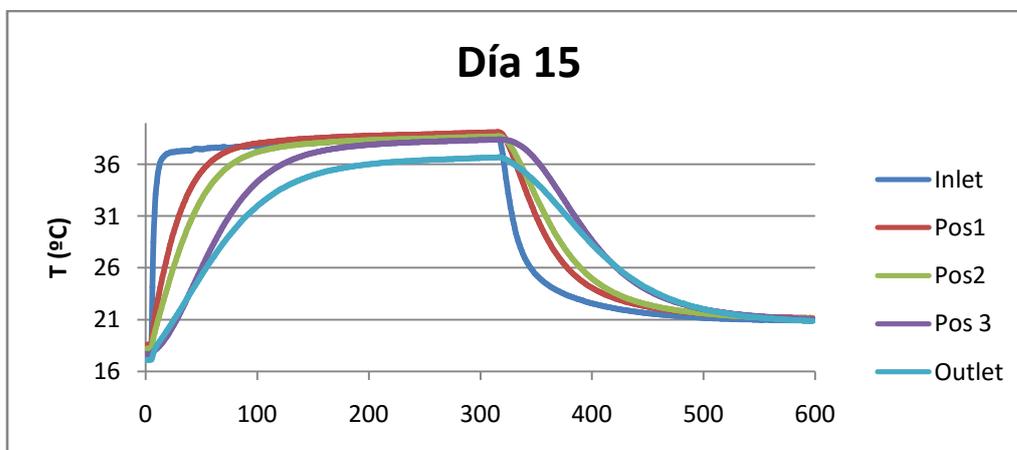


Día 15 (27 de Noviembre). N. Caudal: 2. Temperatura: 40 °C.

09:45. Comienzo.

11:15. Parada.

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	35.00	450.39
Salida	25.00	385.85

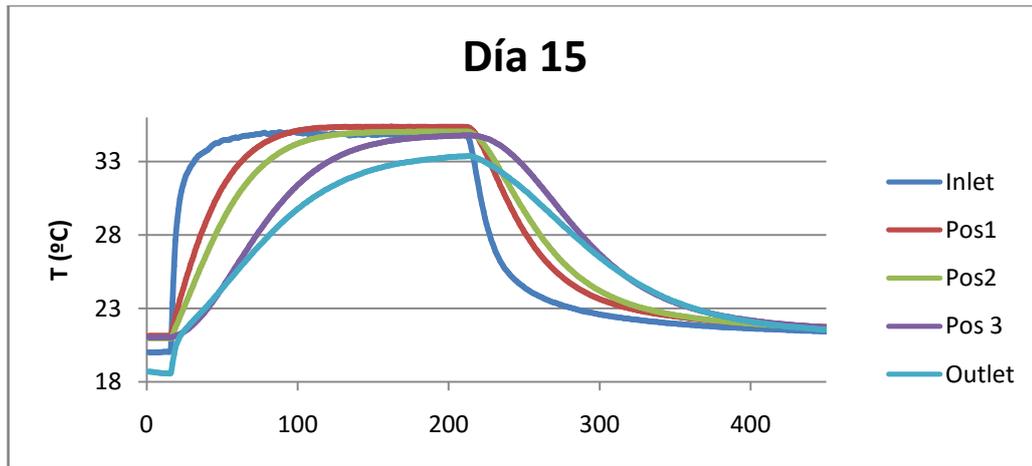


Día 15 (27 de Noviembre). N. Caudal: 2. Temperatura: 35 °C.

13:00. Comienzo.

14:30. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	35.00	450.39
Salida	25.00	385.85

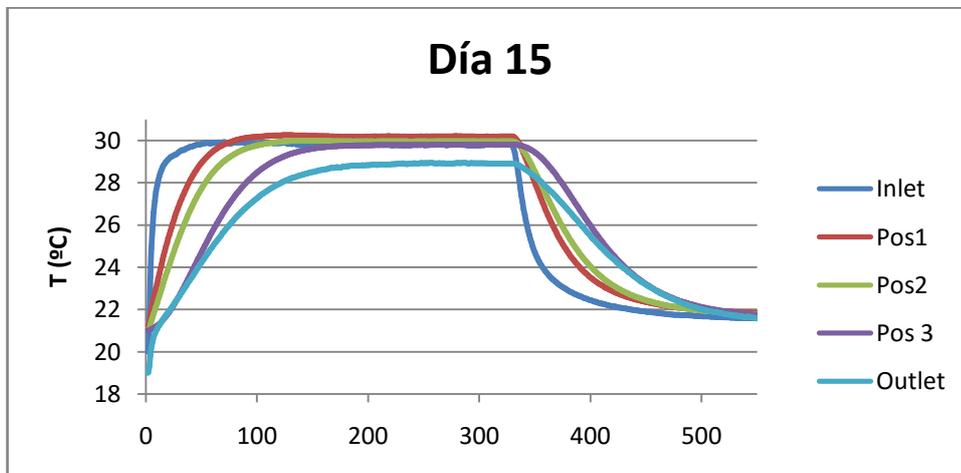


Día 15 (27 de Noviembre). N. Caudal: 2. Temperatura: 30 °C.

17:00. Comienzo.

18:30. Parada.

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	35	450.39
Salida	25	385.85

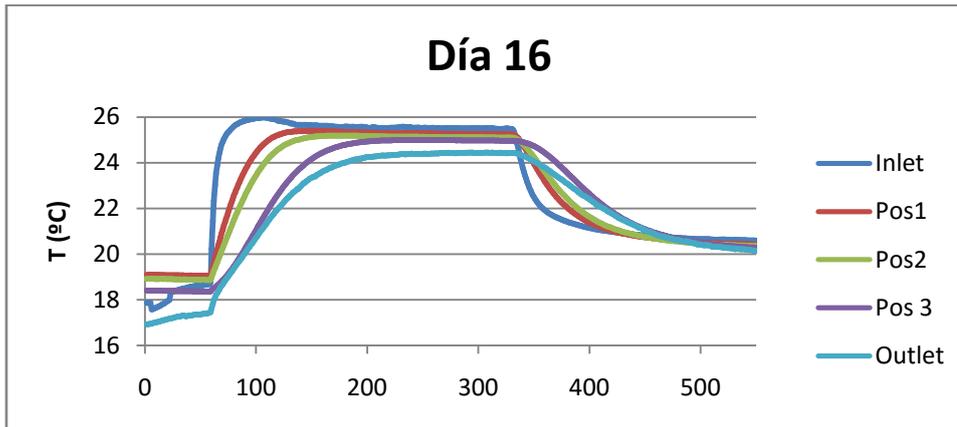


Día 16 (28 de Noviembre). N. Caudal: 2. Temperatura: 25 °C.

08:45. Comienzo

10:15. Parada

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	35	450.39
Salida	25	385.85

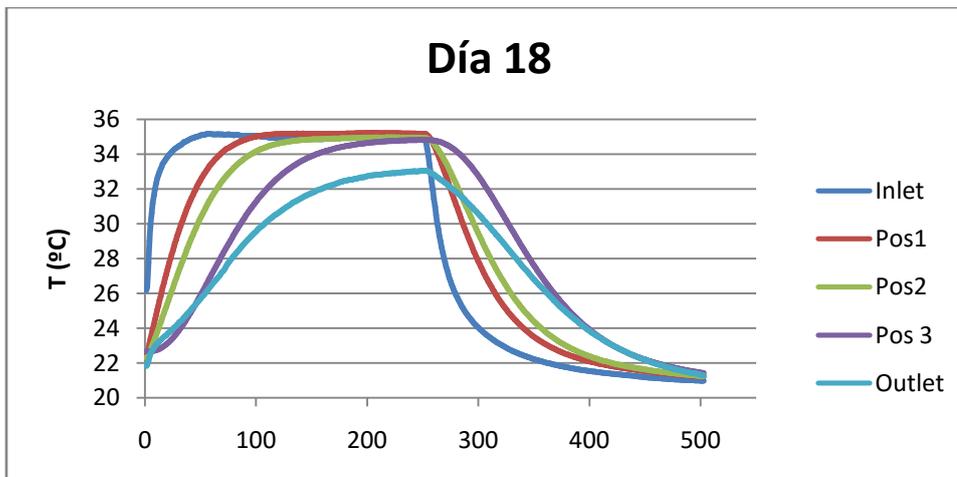


Día 18 (2 de Diciembre). N. Caudal: 1. Temperatura: 35 °C.

13:40. Comienzo

15:20. Parada.

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	23	365.11
Salida	16	308.68

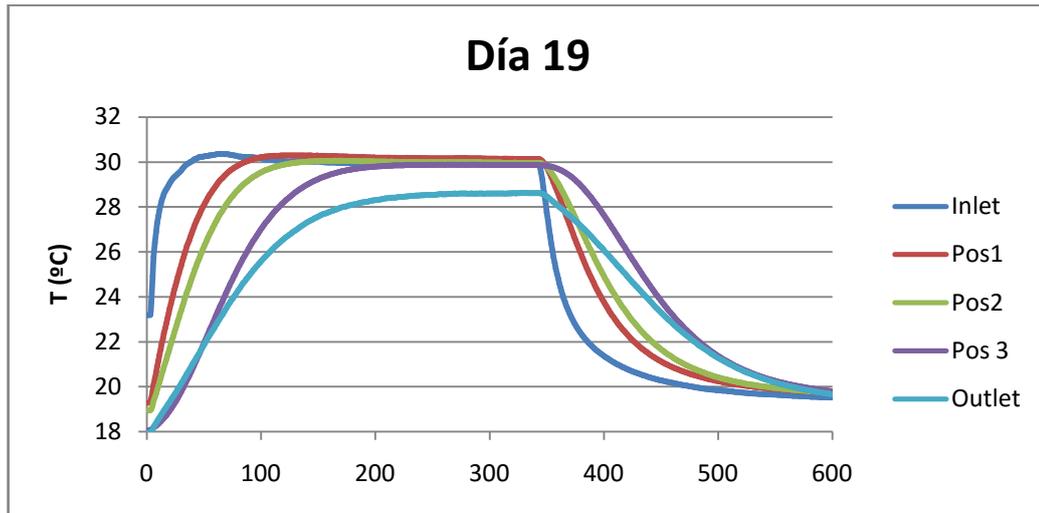


Día 19 (3 de Diciembre). N. Caudal: 1. Temperatura: 30 °C.

08:50. Comienzo.

10:30. Parada.

	ΔP (Pa)	Q (m ³ /h)
Entrada	18.0	322.99
Salida	13.5	283.54



Anexo II: *Datos del Año
Meteorológico Tipo.*

ÍNDICE

All.1 Datos meteorológicos día 46.....	129
All.2 Máximos y mínimos diarios anuales.....	131

AII.1. Datos meteorológicos día 46

Hora	T (°C)
00:00	18,65
01:00	17,75
02:00	16,85
03:00	15,95
04:00	15,05
05:00	14,15
06:00	13,25
07:00	12,80
08:00	14,20
09:00	17,15
10:00	20,15
11:00	23,05
12:00	25,60
13:00	27,50
14:00	28,75
15:00	29,40
16:00	29,25
17:00	28,20
18:00	26,40
19:00	24,80
20:00	23,80
21:00	22,80
22:00	21,80
23:00	20,80

AII.2. Máximos y mínimos diarios anuales

Días	T _{Máx} (°C)	T _{Mín} (°C)	$\Delta T_{Máx \rightarrow Mín}$
1	25,45	15,7	9,75
2	26,3	14,65	11,65
3	27,15	13,75	13,4
4	26,4	12,95	13,45
5	25,85	12,3	13,55
6	25,95	11,7	14,25
7	26,6	12,1	14,5
8	24,65	12,55	12,1
9	24,7	11,5	13,2
10	26,35	11,25	15,1
11	25,95	12,75	13,2
12	22,05	9,05	13
13	23,85	10,65	13,2
14	25,9	10,95	14,95
15	24,75	11,45	13,3
16	24,6	11,55	13,05
17	27,9	12,6	15,3
18	28,1	14,55	13,55
19	29,1	15,1	14
20	28,15	15,25	12,9
21	29,85	16	13,85
22	30,8	15,4	15,4
23	29,75	14,65	15,1
24	27,65	11,8	15,85
25	28	13,9	14,1
26	31,05	15,8	15,25
27	30,85	18,1	12,75
28	28,1	17,2	10,9
29	31,45	16,25	15,2
30	32	18,6	13,4
31	32,85	19,4	13,45
32	31,3	20,15	11,15
33	29,8	19,7	10,1
34	29,55	16,4	13,15
35	25,55	12,7	12,85
36	28,85	14,6	14,25
37	27,25	13	14,25
38	30,15	14,8	15,35
39	26,1	12,45	13,65

40	23,15	15,5	7,65
41	27,5	12,8	14,7
42	29,4	12,8	16,6
43	27,9	13,3	14,6
44	31,95	15,2	16,75
45	22,45	12,05	10,4
46	24,6	12,5	12,1
47	30,75	15,1	15,65
48	32,45	16,6	15,85
49	29,6	13,7	15,9
50	31,5	15,95	15,55
51	32,65	17	15,65
52	35,55	21,3	14,25
53	35,45	23,7	11,75
54	32,25	17,85	14,4
55	34	17,45	16,55
56	32,65	16,45	16,2
57	29,6	18,35	11,25
58	32,9	21,15	11,75
59	35	21,1	13,9
60	32,35	19,05	13,3
61	32,9	18,2	14,7
62	29,85	15,3	14,55
63	27,8	16,55	11,25
64	26,45	20,75	5,7
65	31,5	17,4	14,1
66	30,45	16,65	13,8
67	27,65	14,25	13,4
68	28,1	15,05	13,05
69	29,4	14,25	15,15
70	31,95	17,5	14,45
71	31,3	16,1	15,2
72	32,3	17,5	14,8
73	32,25	19,65	12,6
74	32,15	22,75	9,4
75	34,45	19,9	14,55
76	38,6	26	12,6
77	36,4	21,55	14,85
78	36,7	21,15	15,55
79	34,1	18,7	15,4
80	33,85	19,35	14,5
81	36,45	23	13,45
82	33,8	22,25	11,55
83	35,65	21,3	14,35

84	35,45	21,05	14,4
85	35	19,85	15,15
86	38,8	23,25	15,55
87	37,95	23,1	14,85
88	35,75	21,95	13,8
89	37,35	22,6	14,75
90	38,9	24,45	14,45
91	31,25	19,35	11,9
92	33,8	19,3	14,5
93	30,6	18,45	12,15
94	30,8	23,75	7,05
95	37,85	26,2	11,65
96	37,45	23	14,45
97	40,35	26,9	13,45
98	40,15	26,2	13,95
99	39	25,3	13,7
100	40,95	26,9	14,05
101	41,35	28,1	13,25
102	39,9	26,1	13,8
103	37,05	23,65	13,4
104	36,15	21	15,15
105	37,25	22,45	14,8
106	35,25	22,8	12,45
107	36,45	22,45	14
108	35,05	20,55	14,5
109	33,75	19,45	14,3
110	34,55	21,85	12,7
111	34,2	22,45	11,75
112	37,2	22,9	14,3
113	38,25	23,05	15,2
114	36,2	22,5	13,7
115	38,9	23,25	15,65
116	36,9	22,4	14,5
117	40,65	25,9	14,75
118	35,3	20,45	14,85
119	35,45	22	13,45
120	34,35	19,8	14,55
121	39,5	26,65	12,85
122	40,45	27,55	12,9
123	38,6	30,5	8,1
124	38,85	29,5	9,35
125	40,55	28,9	11,65
126	41,7	28,05	13,65
127	40	27,1	12,9

128	39,1	25,85	13,25
129	37,95	25,05	12,9
130	36,1	23,1	13
131	40	26,15	13,85
132	34,1	22,45	11,65
133	38,1	26,4	11,7
134	37,3	23,95	13,35
135	40,7	27,5	13,2
136	40	26,75	13,25
137	39,8	26,45	13,35
138	38,7	26,4	12,3
139	39,75	27,4	12,35
140	43,45	31,2	12,25
141	42,75	30,25	12,5
142	40,35	31,65	8,7
143	41,55	30,35	11,2
144	40,4	30,25	10,15
145	41,35	28,55	12,8
146	39,5	32,15	7,35
147	42,25	30,4	11,85
148	43,45	30,45	13
149	42	28,6	13,4
150	40,85	28	12,85
151	41,5	28,25	13,25
152	39,7	26,5	13,2
153	39,85	27,3	12,55
154	39,25	28,25	11
155	35,9	25,9	10
156	39,3	27,2	12,1
157	38,45	26,45	12
158	37,85	26,55	11,3
159	35,5	25,8	9,7
160	38,15	24,5	13,65
161	37,55	28,65	8,9
162	40,2	27,7	12,5
163	40,25	28,25	12
164	41,65	29,35	12,3
165	40,15	29,65	10,5
166	37,75	27,05	10,7
167	40,4	29,15	11,25
168	37,55	25,95	11,6
169	40,3	29,4	10,9
170	44,15	32,75	11,4
171	44,05	32,15	11,9

172	43,8	31,7	12,1
173	40,75	33,4	7,35
174	41,6	31,55	10,05
175	39,6	32,1	7,5
176	42,1	34,2	7,9
177	40,15	28,2	11,95
178	39,3	28,3	11
179	41,45	28,55	12,9
180	39,8	28,75	11,05
181	37,95	28,6	9,35
182	37,9	25,65	12,25
183	38,35	27,9	10,45
184	39,65	27,9	11,75
185	36,9	25,55	11,35
186	38,05	25,45	12,6
187	33,9	24,7	9,2
188	36,1	28,55	7,55
189	38,9	28,9	10
190	42,1	30,1	12
191	40,4	28,2	12,2
192	39,35	26,95	12,4
193	37,35	29,1	8,25
194	40,35	27,5	12,85
195	36,25	24,25	12
196	30,8	27,3	3,5
197	36,8	24,85	11,95
198	38,45	26,35	12,1
199	40,35	28,4	11,95
200	38,5	30,7	7,8
201	34,55	29,85	4,7
202	43,35	33,85	9,5
203	42,65	32,35	10,3
204	39,9	31,45	8,45
205	40,7	29,35	11,35
206	39,05	27,55	11,5
207	37,05	26	11,05
208	39,4	28,2	11,2
209	37,3	32,7	4,6
210	39,05	34,35	4,7
211	37,55	27,2	10,35
212	41,65	29,05	12,6
213	35,2	27	8,2
214	35,15	25,5	9,65
215	34,1	23,7	10,4

216	31,95	23,35	8,6
217	35,25	24,35	10,9
218	32,65	26,7	5,95
219	32,3	23,85	8,45
220	35,05	25,15	9,9
221	33,55	24,9	8,65
222	36,05	25,9	10,15
223	35	27,9	7,1
224	35,65	31,6	4,05
225	35,35	26,65	8,7
226	35,2	31,3	3,9
227	36,75	27,2	9,55
228	36,5	26,85	9,65
229	39,95	28,85	11,1
230	41,25	29,85	11,4
231	41,5	31,25	10,25
232	40,2	29,4	10,8
233	38,45	27,5	10,95
234	35,15	26	9,15
235	35,45	26,3	9,15
236	37,75	26,9	10,85
237	39,6	29,05	10,55
238	37,75	27,7	10,05
239	39,4	28,85	10,55
240	39,15	28,45	10,7
241	37,4	27,55	9,85
242	37,75	29,65	8,1
243	40,6	29,55	11,05
244	40,45	28,9	11,55
245	40,25	30,05	10,2
246	41	29,4	11,6
247	42,4	30,4	12
248	41,5	30,15	11,35
249	38,25	29,3	8,95
250	34,85	25,95	8,9
251	37,05	26,75	10,3
252	35	25,2	9,8
253	35,8	23,45	12,35
254	31,45	21,6	9,85
255	32,4	26,1	6,3
256	33,4	27,35	6,05
257	37,7	28,6	9,1
258	38,15	27	11,15
259	38,65	26,55	12,1

260	31,4	24,25	7,15
261	36,3	27,95	8,35
262	36,55	25,4	11,15
263	37,2	25,45	11,75
264	37,85	26,75	11,1
265	37,25	25,8	11,45
266	37,75	26,4	11,35
267	40,15	28,7	11,45
268	36,55	29,9	6,65
269	35	24,8	10,2
270	34,7	26,65	8,05
271	35,05	26,65	8,4
272	36,95	25,15	11,8
273	37,25	26,75	10,5
274	35,55	21,7	13,85
275	34,45	22,05	12,4
276	35,65	22,65	13
277	37,8	23,35	14,45
278	38,1	24,1	14
279	37,8	24,75	13,05
280	38	25,8	12,2
281	36,8	25,15	11,65
282	38,7	24,85	13,85
283	38,1	29,7	8,4
284	37,35	31,3	6,05
285	37,85	29,75	8,1
286	38,5	27,3	11,2
287	37,85	27,45	10,4
288	36,3	28,4	7,9
289	37,45	23,85	13,6
290	38,25	24,75	13,5
291	37,7	25,2	12,5
292	36,25	23,5	12,75
293	38,5	25,65	12,85
294	36,9	26,65	10,25
295	36,7	24	12,7
296	35,75	22,85	12,9
297	36,45	23,5	12,95
298	33,85	22,15	11,7
299	33,05	21,4	11,65
300	33,7	21,8	11,9
301	32,35	20,5	11,85
302	33,35	24,9	8,45
303	35,95	23,55	12,4

304	35,15	22,5	12,65
305	30,05	16	14,05
306	30,65	16,25	14,4
307	31	16,8	14,2
308	31,1	16,85	14,25
309	32,45	18,15	14,3
310	31,8	18,15	13,65
311	32,3	18,1	14,2
312	34,55	20,5	14,05
313	34,85	21,3	13,55
314	35,5	22,55	12,95
315	35,25	23,5	11,75
316	33,2	19,35	13,85
317	33	19,45	13,55
318	32,3	18,85	13,45
319	31,4	17,9	13,5
320	29,95	16,65	13,3
321	31,75	17,9	13,85
322	30,95	17,85	13,1
323	35,65	22,4	13,25
324	33,9	20,5	13,4
325	30,25	16,95	13,3
326	30,9	17,55	13,35
327	32	18,55	13,45
328	30,3	17,1	13,2
329	31,7	18,2	13,5
330	30,85	17,9	12,95
331	31	17,9	13,1
332	29,5	16,55	12,95
333	28,55	15,05	13,5
334	28,9	16,2	12,7
335	28,7	16,2	12,5
336	27,1	11,8	15,3
337	31,75	15,65	16,1
338	30,8	16,6	14,2
339	29	13,15	15,85
340	27,4	14	13,4
341	27,5	14,95	12,55
342	29,95	14,5	15,45
343	27,8	12,2	15,6
344	29,5	13,75	15,75
345	26,3	11,8	14,5
346	30,5	14,65	15,85
347	26,45	14,05	12,4

348	30	16,3	13,7
349	31,1	16,35	14,75
350	32,4	19,6	12,8
351	30,2	15,15	15,05
352	30,8	20,35	10,45
353	31,15	18,1	13,05
354	31,95	16,95	15
355	26,25	11,6	14,65
356	29,2	16,95	12,25
357	25,4	14,65	10,75
358	25,2	11,6	13,6
359	23,95	9,65	14,3
360	24,75	10,6	14,15
361	25,95	11,1	14,85
362	24,65	12,8	11,85
363	27,55	15,6	11,95
364	29,1	15,7	13,4
365	27,1	15,55	11,55

