



3. RESULTADOS.

3.1. Introducción.

Tal y como hemos explicado anteriormente, el consumo energético (energía final) y la demanda de un edificio vienen dados por las expresiones:

$$CONSUMO_{EF} = \frac{DEMANDA\ ENERGETICA}{RENDIMIENTO\ MEDIO\ DEL\ SISTEMA}$$

DEMANDA = f (Clima, Epidermis, Condiciones operacionales y funcionales)

Para realizar nuestros cálculos necesitamos fijar las localidades donde se encuentran los edificios y las condiciones operacionales y funcionales de los mismos. Además definiremos el edificio de estudio en concreto.

3.1.1. Elección de las localidades de estudio.

Escogeremos para realizar nuestros cálculos las ciudades siguientes:

Sevilla (severidad de verano muy alta y severidad de invierno moderadas-baja).

Madrid (severidad de verano e invierno moderadas-altas).

Burgos (severidad de invierno muy alta y severidad verano muy baja).

Estas tres localidades son representativas de tres zonas climáticas extremas y muy distintas entre sí en España. De este modo los resultados obtenidos para prácticamente el resto de localidades se encontrarían entre los resultados obtenidos en Sevilla, Madrid y Burgos (ver figura 8).

| | | | | | |
|--------------------------|----------------------------|-----------------|----|----------------|----------------|
| | A4 | B4 (Sevilla) | C4 | | |
| Severidad Verano 1 a 4 ↑ | A3 | B3 | C3 | D3 (Madrid) | |
| | | | C2 | D2 | |
| | | | C1 | D1 | E1 (Burgos) |
| | | | | | |
| | Severidad Invierno A a E → | | | | |

Fig. 8: Elección de las localidades de estudio.

3.1.2. Condiciones operacionales y funcionales de estudio.

Consideraremos los periodos de refrigeración y calefacción de 24 horas para todos los meses del año salvo en los casos en que se indique lo contrario. Los edificios serán de uso vivienda (baja carga interna).

3.1.3. Edificios de estudio.

Realizaremos estudios para tres edificios distintos.

En primer lugar comenzaremos estudiando el caso de un edificio ficticio muy simple, en forma de cubo y únicamente con cuatro ventanas (una en cada fachada). Con este edificio nuestra única pretensión es comprobar que el procedimiento seguido es correcto y que los resultados obtenidos son coherentes. De este modo, el tiempo de cálculo en cada iteración será pequeño (pocos segundos) y podremos realizar mayor cantidad de pruebas. Además este caso sencillo nos puede servir para afinar los parámetros del algoritmo seleccionado, logrando así encontrar el óptimo en el menor número posible de iteraciones. En este aspecto buscamos que cuando realicemos el análisis de otros edificios más complejos realicemos el menor número posible de iteraciones, ganando así tiempo.

En segundo lugar realizaremos algunas pruebas para el caso de una vivienda adosada.

Finalmente realizaremos algunas pruebas para el caso de una vivienda aislada.

3.1.4. Funciones objetivo de estudio.

Realizaremos la minimización, en cada caso de edificio, para las siguientes funciones objetivo:

3.1.4.1. Consumo anual.

Los COP tomados para refrigeración y calefacción (bomba de calor) para el cálculo del consumo son 2 y 3 respectivamente (pueden ser modificados fácilmente por el usuario). Los periodos tomados para el cálculo de refrigeración y calefacción son todo el año.

$$C = D_v / \text{COP}_v + D_i / \text{COP}_i$$

Los datos de las demandas de verano e invierno anuales son directamente leídas del archivo de resultados calculado por el simulador térmico de edificios.

3.1.4.2. Valor actualizado neto (V.A.N.)

Equivale al sobre coste total (el inicial más el de operación con respecto al diseño original del edificio). En la forma en que lo hemos definido, cuanto menor sea el V.A.N. más ahorro se obtendrá en la inversión.

El periodo de estudio considerado es la vida útil del edificio (unos 50 años), aunque el usuario puede cambiar este parámetro. La referencia es el coste total (inicial más de operación) del diseño inicial. Para el cálculo del coste inicial, tendremos en cuenta el precio de los aislamientos en cubiertas y cerramientos exteriores verticales y el precio del tipo de ventanas. Estos precios se pueden obtener de bancos de precios en la construcción (generador de precios de la construcción de Cype, catálogos de fabricantes como Ursa, Itec, Texa etc.). Por ejemplo, algunos precios podrían ser:

- Aislamiento de lana de roca por cm. de espesor y m²: 1,55 €/cm. m²
- Aislamiento de poliuretano proyectado por cm. de espesor y m²: 1,71 €/cm. m²
- Vidrio simple claro 6mm: 27,88 €/m².
- Vidrio doble claro 6/4/6 aire: 46,01 €/m².
- Vidrio doble claro 8/10/8 aire: 75,95 €/m².
- Vidrio bajo emisivo claro: 89,04 €/m².

Para el cálculo del coste de operación tendremos en cuenta el valor presente de los pagos a un interés del 3% (modificable por el usuario). También tomaremos los COP y los periodos de funcionamiento indicados anteriormente en este caso (modificables por el usuario también). El sobre coste inicial consta de dos términos: el debido a los aislamientos y el debido a los vidrios. El coste de operación se calcula para el total de los años del estudio. Otras magnitudes de interés que se obtienen son el plazo de recuperación de la inversión (payback), el ahorro anual de energía con respecto a la situación de referencia o los Kgs. de CO₂ anuales que dejan de emitirse con respecto a la situación de referencia.

En el anexo de programación se detallan las fórmulas matemáticas empleadas.

3.1.5. Elección de la envuelta del edificio de referencia (diseño inicial).

En cada caso elegiremos como referencia el edificio cuyas características en su epidermis edificatoria sean las mínimas indispensables para el cumplimiento de la limitación de la demanda (HE 1) dada por el programa LIDER. De este modo tenemos un punto de partida válido desde el punto de vista normativo y podemos establecer una aproximación a los valores mínimos admisibles para las variables independientes en el proceso de optimización. A partir de este edificio de referencia comprobaremos si es posible obtener un modelo que ahorre más energía con la menor inversión inicial posible.

Estos edificios de referencia cumplen el C.T.E. y son:

Para la vivienda adosada:

Sevilla:

Aislamientos en cubierta y muros de 1 cm y todos los vidrios simples tipo 1 ($U= 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 1).

Madrid:

Aislamientos en cubierta y muros de 1 cm y 4 cm respectivamente y todos los vidrios dobles tipo 2 ($U= 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 1).

Burgos:

Aislamientos en cubierta y muros de 5 cm y 8 cm respectivamente y todos los vidrios dobles tipo 2 ($U= 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 1).

Para la vivienda aislada:

Sevilla:

Aislamientos en cubierta y muros de 9 cm y 2 cm respectivamente y todos los vidrios simples tipo 1 ($U= 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 1).

Madrid:

Aislamientos en cubierta y muros de 6 cm y 4 cm respectivamente y todos los vidrios dobles tipo 2 ($U= 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 1).

Burgos:

Aislamientos en cubierta y muros de 14 cm y 6 cm respectivamente y todos los vidrios dobles tipo 2 ($U= 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 1).

3.1.6. Resultados que se obtienen del estudio.

Además de la gráfica obtenida con GenOpt de la evolución de la función objetivo y de los valores de los parámetros libres hasta alcanzar el óptimo, podemos obtener los siguientes resultados para cada conjunto de variables independientes:

Para la función objetivo consumo:

- Consumo anual (kwh/m²).
- Demanda de verano (kwh/m²).
- Demanda de invierno (kwh/m²).

Para la función objetivo V.A.N.

- V.A.N. (€).
- Payback (años).
- Ahorro de energía con respecto a la situación inicial (%).
- Reducción de emisiones de CO₂ con respecto a la situación inicial (Kg).
- Sobrecoste inicial con respecto a la situación inicial (€).
- Sobrecoste inicial de aislamientos con respecto a la situación inicial (€).
- Sobrecoste inicial de ventanas con respecto a la situación inicial (€).
- Sobrecoste de operación a lo largo del periodo con respecto a la situación inicial (€).
- Demanda de verano (kwh/m²).
- Demanda de invierno (kwh/m²).
- Consumo anual (kwh/m²).

Así podremos disponer de una información adicional valiosa para todos los puntos que fueron explorados durante el algoritmo en su camino hacia el mínimo. Podremos exportar todos estos datos a una hoja Excel y ordenarlos por V.A.N., payback, ahorro de energía etc. según nos convenga; teniendo así mejores criterios para la elección del diseño final. En el anexo de programación se detallan las fórmulas matemáticas empleadas en el cálculo de estas magnitudes.

3.2. Casos estudiados.

Los casos fueron realizado con un ordenador Pentium 4 de 3.2 GHz de procesador con 1GB de memoria RAM, y con sistema operativo windows XP. Los tiempos empleados en el estudio comprenden desde 5 minutos para el caso más simple hasta algo más de 2 horas para los casos con más variables (6 segundos por iteración para el edificio más sencillo hasta los 45 y 35 segundos para la viviendas adosada y aislada respectivamente, con un número de iteraciones para el caso más complejo fue del orden de doscientas).

Los casos estudiados son los siguientes:

- Dimensiones óptimas de ventana.
- Distribución óptima del porcentaje de huecos por orientaciones.
- Dimensiones óptimas de voladizo.
- Espesores óptimos de aislamientos.
- Tipos óptimos de ventanas.
- Espesores de aislamientos y tipos de ventanas óptimos.

3.2.1. Dimensiones óptimas de una ventana.

En este caso el número de variables es dos (por ventana): el alto y el ancho de la ventana. Es un problema de optimización ya que debido a el tamaño de la ventana se producen unas determinadas ganancias y/o pérdidas térmicas en invierno y/o verano lo que incide en los consumos de energía en climatización. En este caso no consideraremos el precio del vidrio según su tamaño.

El edificio de estudio para este caso es el edificio ficticio sencillo y las localidades de estudio elegidas son Sevilla y Burgos. El método de optimización empleado es el Algoritmo simplex de Nelder y Mead con la extensión de O'Neil.

Resultados obtenidos:

Tanto en Sevilla como en Burgos, para la ventana orientada al sur, la orientada al norte y para ambas al mismo tiempo, obtenemos que las dimensiones óptimas de las ventanas son siempre las más pequeñas posibles. Las ganancias de calor en invierno durante el día y las pérdidas de calor en verano durante la noche no compensan las excesivas ganancias de calor en verano (aumenta el consumo en refrigeración) y las excesivas pérdidas de calor durante las noches de invierno (aumenta el consumo en calefacción). Si además tuviésemos en cuenta los costes el resultado sería más claro aún ya que, por norma general, el metro cuadrado de vidrio es más caro que el metro cuadrado de muro.

Los resultados en detalle en forma de gráficas se muestran en el anexo de resultados correspondiente.

3.2.2. Distribución óptima del porcentaje de huecos por orientaciones.

En este caso el número de variables es el total de superficies libres con huecos menos uno.

Es un problema de optimización ya que según el tamaño de las ventanas por cada orientación se producen unas determinadas ganancias y/o pérdidas térmicas en invierno y/o verano lo que incide en los consumos de energía en climatización. Por otro lado el precio de los vidrios no variará porque la superficie total de vidrios en cada caso es la misma y además se considera que todos los vidrios son iguales.

El edificio estudiado para este caso es el edificio ficticio sencillo y las localidades de estudio elegidas son Sevilla y Burgos. El método de optimización empleado es el Algoritmo simplex de Nelder y Mead con la extensión de O'Neil.

Resultados obtenidos:

Tanto en Sevilla como en Burgos obtenemos que los porcentajes óptimos de huecos son los mayores posibles para las orientaciones Este y Norte y las menores posibles para las orientaciones Sur y Oeste. Para esta configuración el consumo anual es el mínimo posible. Las ganancias de calor en invierno durante el día y las pérdidas de calor en verano durante la noche no compensan las excesivas ganancias de calor en verano (aumenta el consumo en refrigeración) y las excesivas pérdidas de calor durante las noches de invierno (aumenta el consumo en calefacción), y las orientaciones que más penalizan esta circunstancia son las orientaciones Sur y Oeste.

Los resultados en detalle en forma de gráficas se muestran en el anexo de resultados correspondiente.

3.2.3. Dimensiones óptimas de voladizo.

Es un problema de optimización ya que existen unas dimensiones óptimas del voladizo para las cuales se bloquea la radiación en verano (posición solar elevada) y sin embargo en invierno la radiación si puede incidir en el vidrio (posición solar baja). De esta manera evitamos las ganancias solares excesivas en verano, reduciendo el consumo en refrigeración y conseguimos obtener ganancias solares en invierno, reduciendo el consumo en calefacción. Por norma general se situarán los voladizos en ventanas orientadas al sur preferentemente.

El edificio de estudio para este caso es el edificio ficticio sencillo y las localidades de estudio elegidas son Sevilla y Burgos. El método de optimización empleado es el Algoritmo simplex de Nelder y Mead con la extensión de O'Neil. Los resultados en forma de gráficas se muestran en el anexo de resultados correspondiente.

Resultados obtenidos:

En Sevilla obtenemos que la altura óptima con respecto a la ventana del voladizo es de 0.5 m y la longitud óptima del voladizo es de 1.51m., mientras que en Burgos

obtenemos que la altura óptima con respecto a la ventana del voladizo es de 0.5 m y la longitud óptima del voladizo es de 0.85m.

Para estas dimensiones de voladizo el consumo anual es el mínimo posible. El voladizo bloquea parte de la radiación solar durante los días de verano (ahorro en consumo de refrigeración) mientras que permite el paso de dicha radiación solar durante los días de invierno (ahorro en consumo de calefacción).

Los resultados en detalle en forma de gráficas se muestran en el anexo de resultados correspondiente.

3.2.4. Espesores óptimos de aislamientos.

Emplearemos dos variables: el espesor de aislamiento de la cubierta y el espesor de aislamiento de los muros exteriores.

Es un problema de optimización ya que al aumentar los espesores se producen menos pérdidas térmicas en invierno y menos ganancias térmicas en verano en el edificio, lo que incide en un ahorro en los consumos de energía en climatización, pero por otro lado aumenta el precio de los materiales empleados en la construcción del edificio.

Los edificios estudiados para este caso son la vivienda adosada y la vivienda aislada y las localidades de estudio elegidas son Sevilla, Madrid y Burgos. El método de optimización empleado es el Método Particle Swarm Optimization.

Resultados obtenidos:

Cabe destacar el resultado obtenido para la vivienda adosada en el caso de Sevilla, en el cual partiendo de aislamientos en muros y cubierta de 1 cm (y todos los vidrios simples), obtenemos una solución óptima de espesores de aislamiento de 1 cm en cubierta y 6 cm en los muros, con un ahorro total de 625.50 € un ahorro de energía anual del 17% aproximadamente y una recuperación de la inversión de 10 años. El sobre coste inicial en este caso es de 324 €

Los resultados en detalle para el resto de localidades y para ambos edificios se muestran en forma de tablas en el anexo de resultados correspondiente.

3.2.5. Tipos óptimos de ventanas.

Emplearemos una variable por cada orientación libre al exterior. Por ejemplo, para el caso de la vivienda adosada con dos orientaciones al exterior tendremos dos variables, para el caso de una vivienda aislada serían cuatro; se considerarán iguales todas las ventanas por orientación.

Los tipos de ventanas empleados en el análisis son representativos de los que se emplean en construcción:

TIPO 1: Vidrio simple ($U= 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 1).

TIPO 2: Vidrio doble ($U= 3.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 0.72).

TIPO 3: Vidrio doble ($U= 2.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 0.45).

TIPO 4: Vidrio bajo emisivo ($U= 2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 0.65).

Es un problema de optimización ya que al aumentar la calidad de los vidrios se producen menos pérdidas térmicas en invierno y menos ganancias térmicas en verano en el edificio lo que incide en un ahorro en los consumos de energía en climatización pero por otro lado aumenta el precio de los materiales empleados en la construcción del edificio.

Los edificios estudiados para este caso son la vivienda adosada y la vivienda aislada y las localidades de estudio elegidas son Sevilla, Madrid y Burgos. El método de optimización empleado es el Método Particle Swarm Optimization.

Cabe destacar el resultado obtenido para la vivienda adosada en el caso de Sevilla, en el cual partiendo de todos los vidrios simples (y aislamientos en muros y cubierta de 1 cm), obtenemos una solución óptima de vidrios tipo 3 en las dos orientaciones libres: vidrio doble con $U= 2.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 0.45.

De esta forma, el ahorro total es de 600.08 € con un ahorro de energía anual del 16.94% y una recuperación de la inversión de 11 años. El sobrecoste inicial en este caso es de 353.8 €

Los resultados en detalle para el resto de localidades y para ambos edificios se muestran en forma de tablas en el anexo de resultados correspondiente.

3.2.6. Espesores de aislamientos y tipos de ventanas óptimos.

Las variables en este caso serían las dos correspondientes a los espesores de aislamiento de la cubierta y de los muros exteriores más las correspondientes a los tipos de ventanas por orientación considerados.

Es un problema de optimización ya que al aumentar la calidad de los materiales se producen menos pérdidas térmicas en invierno y menos ganancias térmicas en verano en el edificio lo que incide en un ahorro en los consumos de energía en climatización pero por otro lado aumenta el precio de los materiales empleados en la construcción del edificio.

Los edificios estudiados para este caso son la vivienda adosada y la vivienda aislada y las localidades de estudio elegidas son Sevilla, Madrid y Burgos. El método de optimización empleado es el Método Particle Swarm Optimization.

Cabe destacar el resultado obtenido para la vivienda aislada en el caso de Sevilla, en el cual partiendo de aislamientos en cubierta y muros de 9 cm y 2 cm respectivamente con todos los vidrios dobles (tipo 2: Vidrio doble con $U= 3.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 0.72) , obtenemos una solución óptima de 4 cm en cubierta y 2 cm en los muros, con vidrios simples tipo 1 ($U= 5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 1) en las orientaciones Norte y Oeste y vidrios dobles tipo 3 ($U= 2.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar 0.45) en las orientaciones Sur y Este.

De esta forma, el ahorro total alcanza los 1904.79 € con un ahorro de energía anual del 28% y una recuperación de la inversión instantánea ya que el sobrecoste inicial en este caso es menor de cero. Con esta solución no sólo ahorraríamos energía, sino que además ahorraríamos dinero en materiales con respecto a la situación original.

También cabe destacar el resultado obtenido para la vivienda adosada en el caso de Sevilla, en el cual partiendo de aislamientos en muros y cubierta de 1 cm y todos los vidrios simples, obtenemos una solución óptima de 1 cm en cubierta y 7 cm en los muros, con vidrios tipo 3 en las dos orientaciones libres (vidrio doble con $U= 2.7$ W/m²K y factor solar 0.45).

De esta forma, el ahorro total alcanza los 1378.53 € con un ahorro de energía anual del 37.69% y una recuperación de la inversión de 10 años. El sobre coste inicial en este caso es de 743.46 €

Los resultados en detalle para el resto de localidades y para ambos edificios se muestran en forma de tablas en el anexo de resultados correspondiente.