

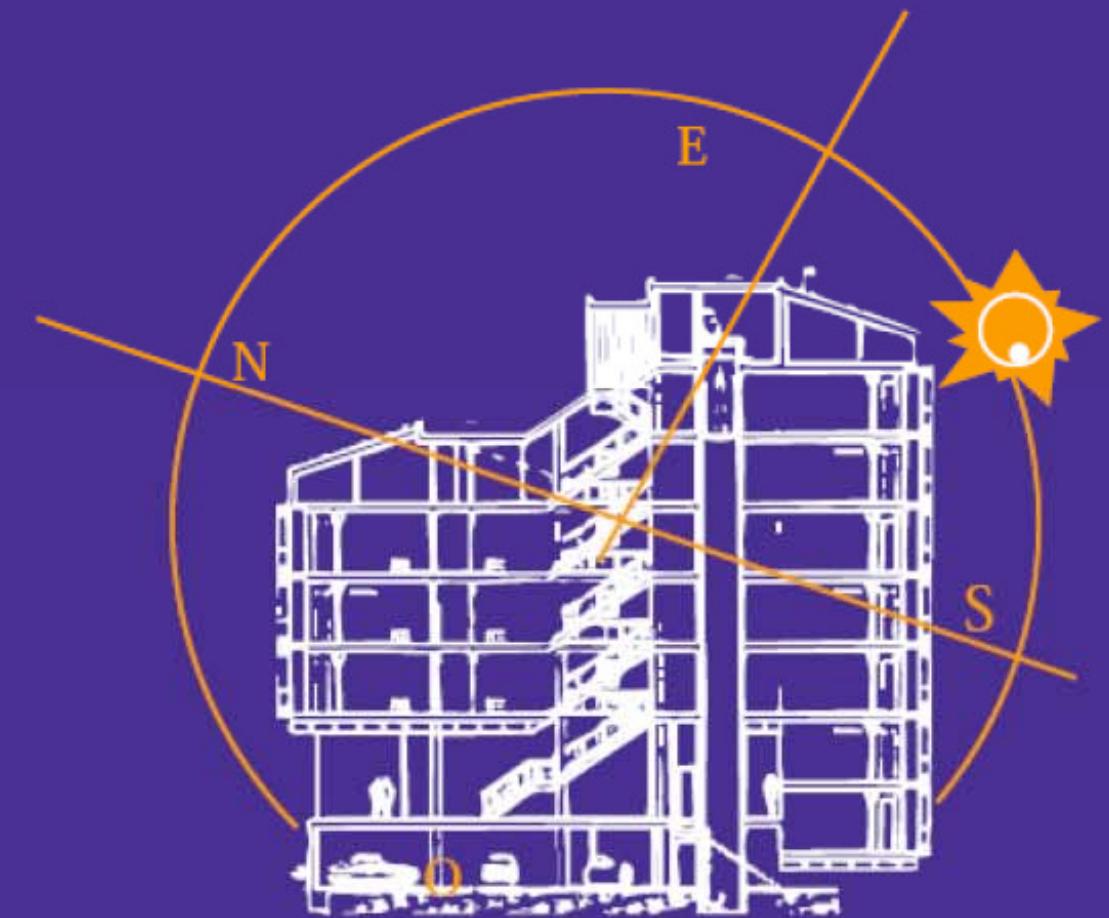


Tesis doctoral

Miguel Ángel Hernández Cruz
Modelo de evaluación de la demanda energética en la planificación urbanística.
Aplicación al estudio de Parque Goya

Tesis doctoral

Modelo de evaluación de la demanda energética en la planificación urbanística.
Aplicación al estudio de Parque Goya



Doctorando: Miguel Ángel Hernández Cruz
Director tesis: Dr. José Antonio Turégano Romero
Área de Máquinas y Motores Térmicos
Departamento de Ingeniería Mecánica

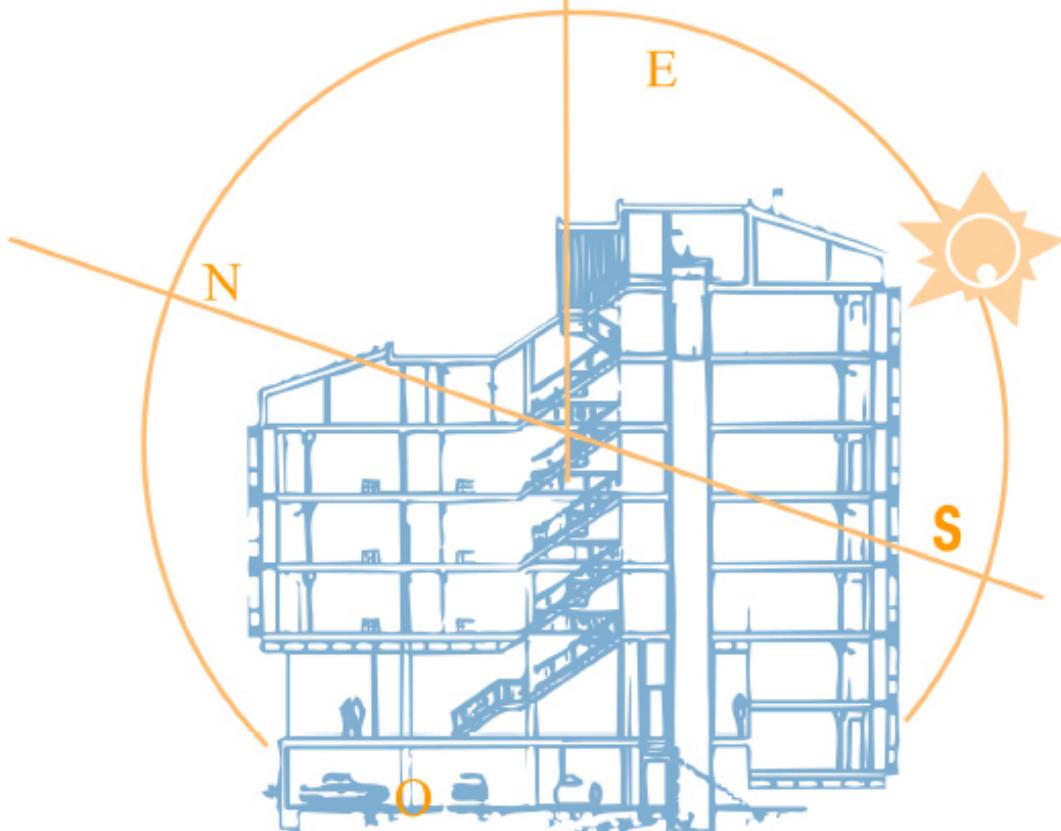
Universidad de Zaragoza

Tesis doctoral

Modelo de evaluación de la demanda energética en la planificación urbanística. Aplicación al estudio de Parque Goya

Doctorando: Miguel Ángel Hernández Cruz
Director tesis: Dr. José Antonio Turégano Romero
Área de Máquinas y Motores Térmicos
Departamento de Ingeniería Mecánica

Universidad de Zaragoza



Se permite fotocopiar todo el documento a quien le pueda resultar de interés.

Doctorando: Miguel Ángel Hernández Cruz

Director de tesis: Dr. José Antonio Turégano Romero

Área de Máquinas y Motores Térmicos

Departamento de Ingeniería Mecánica

Universidad de Zaragoza

Título de la tesis: Modelo de evaluación de la demanda energética en la planificación urbanística. Aplicación al estudio de Parque Goya

© El autor, 25 de abril de 2008

Dedicaciones

Con todo cariño a Loli y a mi pequeño Valentín. Por fin tendremos los veranos libres sin tener que actualizar o modificar la tesis por un cambio normativo.

A mis padres Ángel y Conchi por el esfuerzo que les supuso que fuera ingeniero.

Agradecimientos

A José Antonio Turégano, director del Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza, por las horas de trabajo que hemos compartido y por el aprendizaje tan enriquecedor que ha supuesto estar a tu lado durante más de 10 años en los que participé en los proyectos más importantes de urbanismo bioclimático de España (Barrio Goya, Valdespartera y Sarriguren).

A mis maestros, Luis Forcano y Luis Lezaún, que me hicieron disfrutar de la ingeniería y aprender el sentido de ésta.

Índice

1. Objetivos y alcance de la tesis	1
1.1 Oportunidad de esta tesis	3
1.2 Las simulaciones energéticas: Estado del arte	19
1.3 Hipótesis y objetivos de la tesis	27
2. Antecedentes históricos del urbanismo y planificación urbanística	29
2.1 Movimiento solar	34
2.2 Primeras ciudades	34
2.3 Ciudades griegas	35
2.4 Ciudad romana	38
2.5 Ciudad musulmana y medieval	41
2.6 La ciudad barroca	42
2.7 Urbanismo en el siglo XIX y XX	43
2.8 Parámetros urbanísticos y consumo energético	58
2.8.1 Planificación urbanística	58
2.8.2 Los Planes Parciales y los parámetros urbanísticos	62
2.8.3 Reducción del consumo energético en urbanismo	64
2.9 Introducción de aspectos reguladores energéticos en urbanismo	68
2.9.1 Planeamiento con escasa o nula definición	70
2.9.2 Planeamiento con evaluación energética más normas de concurso	71
2.9.3 Planeamiento que utiliza la ordenanza como soporte de la mayor parte de las condiciones bioclimáticas	72
3. Balance energético de edificios y método de modelación propuesto	75
3.1 Balance energético de edificios con demanda de calefacción	76
3.1.1 Balance energético de los cerramientos	77
3.1.2 Balance energético del recinto	78
3.2 Métodos de cálculo	79
3.3 Datos climáticos utilizados en simulación energética de edificios	83
3.3.1 Datos climáticos en métodos simplificados	83
3.3.2 Datos climáticos en métodos detallados. Ficheros TRY	84
3.3.2.1 Ficheros TRY basados en datos medios mensuales	86
3.3.2.2 Ficheros TRY basados en datos horarios climáticos	95
3.3.2.3 TRY sintéticos o reales en la modelación	95
3.3.2.4 La función de los TRY sintéticos en el análisis urbanístico	96

3.4 Parámetros necesarios para realizar el balance energético	96
3.5 Procedimiento de validación del ‘método propuesto’ en urbanismo	98
3.5.1 Selección de métodos de cálculo	101
3.5.2 Condiciones de referencia de cálculo (CRC) de edificios patrón	102
3.5.3 Edificios patrón empleados en la validación	103
3.5.3.1 Vivienda unifamiliar aislada	104
3.5.3.2 Unifamiliares adosadas	107
3.5.3.3 Bloque de 6 viviendas	109
3.5.3.4 Bloque de 40 viviendas	112
3.5.3.5 Bloque de 80 viviendas	116
3.5.4 Generación del clima horario en la validación	120
3.5.4.1 Test de validación en la construcción de los TRY sintéticos	121
3.5.5 Localización y clima de las poblaciones analizadas en la validación	125
3.5.6 Importancia de la precisión de los modelos de conversión de la radiación solar. Análisis de las diferentes desviaciones posibles.	127
3.6 Análisis de resultados y validación del método propuesto	136
3.6.1 Efectos de la inercia térmica y modificación de su cálculo en el Método 5000	137
3.6.2 Cálculo de una inercia térmica apropiada	150
3.6.3 Método propuesto para calefacción	153
3.6.4 Modificación de la captación solar en cerramientos opacos	159
3.6.5 Método propuesto para refrigeración	160
3.6.6 Validación combinada de calefacción y refrigeración	162
3.6.7 Validación del cálculo con el modelo propuesto	164
3.7 Criterios adicionales del método propuesto	165
4. Diseño de urbanizaciones desde el punto de vista energético. Aplicación al caso de Parque Goya	167
4.1 Extensión del método propuesto a la evaluación energética de una urbanización	168
4.1.1 Sombreamiento propio	169
4.1.2 Sombreamientos externos	173
4.1.3 Sombreamiento combinado exterior y propio	183
4.1.4 Implementación del cálculo energético de una urbanización	184
4.2 Edificios y Urbanización de referencia	185
4.2.1 Consideraciones mínimas de comportamiento para el ahorro de energía en edificios	187
4.2.2 Demanda máxima de la urbanización de referencia	188
4.2.3 Demanda mínima de la urbanización de referencia	189
4.2.4 Estimación del ahorro energético o bondad del diseño de una urbanización	190
4.3 Análisis de parámetros que condicionan la demanda energética	191

4.3.1 Parámetros propios del edificio	191
4.3.1.1 Edificios base para los análisis de parámetros del edificio y de la urbanización	192
4.3.1.2 Influencia del grado de aislamiento	196
4.3.1.3 Porcentaje de acristalamiento y orientación del edificio	203
4.3.2 Parámetros urbanísticos	209
4.3.3 Resumen de parámetros de diseño que afectan a la demanda energética	217
4.3.4 Compacidad de áreas urbanas	218
4.4 Optimización de la demanda energética de urbanizaciones	221
4.5 Aplicación de la metodología de análisis urbanístico a Residencial Parque Goya	223
4.5.1 Propuesta urbanística en Residencial Parque Goya	223
4.5.2 Contexto bioclimático de Residencial Parque Goya	224
4.5.3 Consumos energéticos en Residencial Parque Goya	225
4.5.4 Características del confort	233
4.5.5 Anomalías	237
4.5.6 Resultados de la aplicación de la metodología de análisis urbanístico propuesta a Residencial Parque Goya	245
4.5.7 Conclusiones	250
5. Síntesis, aportaciones y perspectivas	253
5.1 Síntesis	253
5.2 Aportaciones	263
5.3 Perspectivas	268
6. Conclusiones de la tesis	271
6.1 Conclusiones	271
Anexo A. Características de materiales	277
Anexo B. Radiación horaria sobre fachadas	279
B.1 Radiación global horaria media mensual sobre horizontal	279
B.2 Radiación difusa horaria media mensual sobre horizontal	283
B.3 Radiación directa horaria media mensual sobre horizontal	285
B.4 Validación del cálculo de la radiación horaria sobre superficies	287
Anexo C. Ordenanzas Reguladoras en el Plan Parcial de Residencial Parque Goya	291
C.1 Descripción de la actuación urbanística de Residencial Parque Goya	292
C.2 Ordenanzas reguladoras de Residencial Parque Goya	299
Anexo D. Balance energético de edificios. Revisión de métodos de cálculo simplificados y detallados	323
D.1 Método simplificado (Grados Día)	323

D.2 Métodos simplificados corregidos de calefacción (Método 5000 y UNE-EN 832)	329
D.2.1 Método 5000	331
D.2.2 Norma UNE-EN 832	352
D.3 Método simplificado corregido de refrigeración	354
D.3.1 Método detallado (TSBI3)	358
D.3.1.1 Características y potenciales del programa TSBI3.	365
Anexo E. Generación TRY a partir de datos climáticos horarios	367
E.1 Construcción de un TRY a partir de datos climáticos horarios	367
Bibliografía	375

Capítulo 1

Objetivos y alcance de la tesis

En el desarrollo de nuevas áreas urbanas no se suelen tener en cuenta las posibilidades del ahorro energético; tan sólo una simple medida como la orientación de los edificios podría conseguir una reducción del 30% de la demanda de calefacción¹ o hacer innecesaria la refrigeración termomecánica, si es aprovechada de manera óptima por el diseño posterior de los edificios.

Hay que tener en cuenta que en la fase de diseño urbanístico puede existir cierta o total flexibilidad en la disposición de la trama de calles, el uso de los espacios, y en menor grado las densidades edificatorias y, consecuentemente, la altura de los edificios. El nivel de flexibilidad será función de los condicionantes geográficos, de la existencia de una trama previa o incluso puede existir total libertad. Lógicamente, siempre dentro de la normativa aplicable en cada municipio que, en muchos casos podrá elaborarse o modificarse a partir del correspondiente estudio con una filosofía similar a la desarrollada en esta tesis.

Unos criterios generales como facilitar que la mayor parte de los edificios dispongan de fachadas con orientación sur y que se evite el sombreadamiento entre edificios, contribuirán a sacar partido a la posibilidad del aprovechamiento solar.

En la fase inicial de concepción de la urbanización el diseñador urbanístico conocerá los volúmenes y separación de los edificios, pero desconocerá las características que definen exactamente los edificios (apariencia, materiales, acristalamientos, etc.,) teniendo que hipotetizar la configuración y conformación de éstos si quiere estimar a priori el consumo energético de la urbanización.

Para determinar cual es la mejor orientación de un edificio, o el efecto que tiene el sombreadamiento externo sobre el consumo de calefacción, se puede recurrir a la simulación con programas que realizan el balance energético del edificio. En función del resultado que se obtenga con éstos se podrán tomar decisiones que mejoren el comportamiento térmico o conocer en qué porcentaje una medida es negativa.

En las últimas décadas se han realizado esfuerzos importantes para desarrollar herramientas de cálculo que determinan el balance energético de un edificio. Estas aplicaciones permiten obtener el consumo de calefacción, de refrigeración y analizar la evolución de temperaturas en el interior

¹ Para edificios en muchos puntos del interior de la península y de acuerdo con la normativa NBECT-79. En edificios mejor aislados (nuevo CTE) el aporte puede suponer un porcentaje mayor de la demanda de calefacción al reducirse el valor absoluto de ésta.

del edificio. Estos programas deben partir de una definición exacta del edificio, obteniéndose mejor aproximación cuanto mayor es el grado de detalle.

La aplicación de estas herramientas cuando se diseña una urbanización requiere un gran esfuerzo para simular cada edificio individualmente, siendo innecesario el nivel de detalle exigido y no existiendo, en ese momento, una definición clara de cómo podrían ser los edificios.

Considerando lo anterior, se puede enunciar ya el objetivo principal de la tesis:

Es posible determinar, con suficiente precisión y mínimo esfuerzo, la configuración de un determinado proyecto urbanístico, de modo que se minimice la demanda energética anual respetando los condicionantes que exija el mencionado proyecto en cuanto a criterios de edificabilidad, microclima, normativa, etc.

En el apartado 1.3 se enuncia el resto de objetivos de las tesis.

Así, la tesis pretende obtener un método simplificado de cálculo de la demanda energética de edificios de una urbanización que sea suficientemente aproximado como para permitir una evaluación de diferentes configuraciones urbanísticas y su comparación, permitiendo la optimización². El rango intrínseco de error deberá ser igual o inferior que el resultante de los errores propios de los datos necesarios de partida (clima, características de cerramientos, etc).

Los modelos a introducir en el método de cálculo partirán de la definición de pocos datos que caractericen los edificios, debiendo permitir la modificación rápida de la configuración y de la tipología de los edificios que configuran la urbanización.

Las tesis se ha dividido en cinco capítulos en los que se justifica el método de cálculo comprobándose la validez de las hipótesis y el modelo propuesto. La división realizada es la siguiente:

- Capítulo 1: incluye una retrospectiva del estado del arte, la explicación de por qué esta tesis, las hipótesis previas que se han realizado y la forma en que se desarrolla ésta.

² Dado que la función demanda de consumo de la urbanización $f(x)$ y las m restricciones $g(x)$ a las que está sometida son de tipo polinómico, siendo funciones continuas y derivables hasta segundo orden, se podrían obtener los mínimos de consumo de la urbanización aplicando los multiplicadores de Lagrange (Cobo A., 1995). Los valores óptimos(x^*) se podrían obtener con la resolución del siguiente sistema de ecuaciones de dimensión $n+m$.

$$g_i(x^*) = 0 \quad i=0, \dots, m$$

Estas funciones representan las ganancias solares, las pérdidas por conducción, las infiltraciones, etc. Podemos, así obtener la condición de extremal a partir de la expresión

$$\frac{\partial f(x^*)}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \times \frac{\partial g_j(x^*)}{\partial x_i} = 0 \quad i=0, \dots, n$$

donde λ_j son los multiplicadores de Lagrange de las funciones restricción.

Como se verá más adelante, no se ha seguido esta metodología sino un procedimiento de optimización basado en sucesivas acciones ya que el número de variables y la definición de ligaduras resulta más laborioso que las acciones directas sobre variables determinadas.

- Capítulo 2: se analiza una retrospectiva histórica sobre el urbanismo y el aprovechamiento solar, iniciando el análisis con las primeras ciudades (milenio IV a.C.) para finalizar con la arquitectura del siglo XX.

Este capítulo permite comprobar cómo la sociedad ha ido dejando de lado la arquitectura tradicional, pasando al edificio basado en el uso intensivo de la tecnología, en el que se mantienen las condiciones de confort con potentes sistemas auxiliares y con elevados costes energéticos.

Una vez analizada la evolución del urbanismo se recogen los principales parámetros que lo definen, realizándose un análisis de cómo introducir en los Planes Parciales, Especiales o Normas de Concursos las medidas adecuadas para facilitar el aprovechamiento solar, incluyendo aspectos reguladores mínimos que tengan como objetivo mejorar los aspectos energéticos.

- Capítulo 3: basándose en la revisión de métodos de cálculo del Anexo D se analiza la dificultad para definir los datos climáticos a emplear en simuladores.

A partir de la exposición de métodos de cálculo, se pasa a obtener y validar el método propuesto en la tesis que puede ser utilizado en estudios urbanísticos para caracterizar la bondad de su diseño.

- Capítulo 4: análisis paramétrico, para diferentes climas representativos de una panorámica general española, de la importancia que representa en el consumo energético de edificios los entramados de las calles, la orientación de éstas, la altura de los edificios, la edificabilidad, el grado de aislamiento y los porcentajes de acristalamiento.

Vistos los diferentes parámetros que influyen en la demanda energética de edificios, se ha aplicado la metodología de evaluación energética propuesta en la tesis a las Fases II y III de la urbanización Residencial Parque Goya de Zaragoza, comprobándose la bondad del diseño y el aprovechamiento energético que se puede hacer en un área urbana.

- Capítulo 5: aborda la síntesis, la aportación y las perspectivas de esta tesis.
- Anexos: complementan la parte teórica de algunos aspectos incluidos en esta tesis.

1.1. Oportunidad de esta tesis

En el diseño urbanístico energético existen tres niveles diferentes de actuación (Goulding J. R. 1993), estos son:

- Un primer nivel que implica la planificación urbana, donde las acciones se desarrollan a gran escala (crecimientos de ciudades o creación de nuevos núcleos, figura 1.1).
- Descendiendo a un segundo nivel aparece el desarrollo de la morfología urbana, aplicada a grupos de edificios adyacentes y a la definición de su entorno (calles, zonas verdes, etc).
- El nivel inferior corresponde al diseño del edificio, donde se actúa individualmente bajo unas reglas generales marcadas por el urbanismo y sus correspondientes planes parciales, y donde el diseñador posee bastante libertad (definición estética y de soluciones técnicas a utilizar).

Además debe considerarse un cuarto nivel que corresponde a la actuación consciente o no del usuario (Turégano J.A., et al, 2002e) y que puede suponer desviaciones significativas respecto del consumo final medio, como se pone de manifiesto en los resultados mostrados de Residencial Parque Goya en el apartado 4.5.5.

En esta tesis se va a incidir en el segundo nivel de actuación el cual trata de definir las calles y los parámetros urbanísticos que deben seguir los edificios. En esta fase se conoce el espacio y la forma del terreno reservada para la construcción de los edificios, pero se desconoce su forma exacta; pudiendo plantear hipotéticamente las formas de estos (superficies envolventes, volumen y edificabilidad) de acuerdo con la normativa preexistente. En la figura 1.2 se muestra el grado de definición de este segundo nivel.

La composición final de las fachadas (objeto del tercer nivel) no se conoce en la fase de desarrollo de una nueva zona urbana, siendo competencia final del arquitecto. Pero el análisis energético urbanístico en el nivel previo objeto de este trabajo puede imponer algunas reglas sobre el diseño del edificio y sus fachadas (altura, porcentajes de acristalamiento según orientación y calidad exigida a los cerramientos acristalados, niveles de aislamiento mínimo).

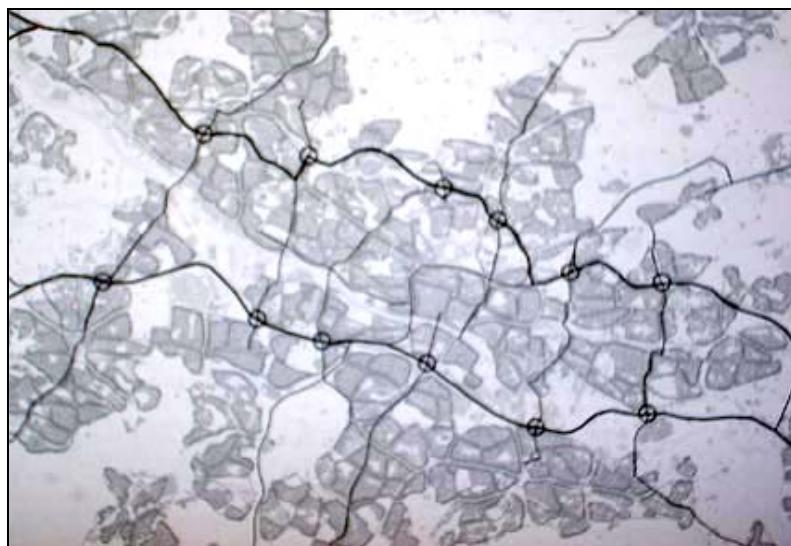


Figura 1.1. Vías de comunicación rápida que definen las zonas de crecimiento de una ciudad. (Hildebrand., 1999)



Figura 1.2. Planificación urbana con la definición de calles y formas básicas de edificios que podrían desarrollarse en las parcelas. (Oglyay V., 1998)

La influencia en la definición de los parámetros urbanísticos desde el punto de vista energético viene condicionada por la severidad climática del lugar en que se ubicará la urbanización. Los principales factores climáticos que condicionan el diseño son:

- temperatura,
- radiación solar,
- velocidad del viento
- humedad relativa.

De los anteriores factores climáticos, los más importantes son la temperatura y la radiación solar, ya que los otros dos inciden más en el diseño del edificio, por ejemplo, al objeto de favorecer la ventilación o en la ordenación de espacios verdes, distribución de láminas de agua preparadas para aumentar o reducir la humedad ambiental posibilitando condiciones próximas al espacio de confort térmico que reduzcan las necesidades de energía auxiliar, sobre todo en el caso de necesidades de refrigeración. Así, los dos primeros son los únicos que se tienen en cuenta en los métodos simplificados de cálculo mensual de necesidades energéticas³. En el Anexo D se realiza una exposición de estos métodos.

³No cabe duda que sólo los dos primeros son relativamente fáciles de incorporar a un modelo algorítmico que permita realizar un análisis energético por ordenador. Los efectos de una mayor o menor ventilación pueden incorporarse mediante el número de renovaciones, por ejemplo en el caso de la ventilación nocturna. Pero tanto este efecto como el de la humedad para un enfriamiento evaporativo, por ejemplo, corresponden más al tercer nivel y por eso no se ha pretendido un modelo simplificado que incluyera estos efectos. Sin embargo, el programa URSOS desarrollado por encargo del IDAE en paralelo con los planteamientos de la tesis si permite analizar el efecto de una mayor o menor ventilación nocturna además del análisis optimizado para los dos primeros factores: temperatura y radiación.

Dependiendo de la zona climática en la que esté situada la urbanización, habrá que actuar de diferentes modos para un diseño adecuado, por ejemplo, en la relación calle – edificio:

- Para climas cálidos uno de los objetivos del urbanismo será reducir la captación solar, para lo cual se podrá optar por un diseño de calles estrechas situándose los edificios próximos para aprovechar al máximo el sombreado que arrojan, y con la orientación más adecuada para recibir las brisas o vientos locales del verano.
- En climas fríos habrá que intentar captar la mayor radiación posible para reducir el consumo de calefacción, separando los edificios adecuadamente en función de su altura.
- En climas que combinen ambas necesidades será preciso seguir las indicaciones que se extraigan de la optimización de los modelos, debiendo seguir como diseño los criterios que facilita el balance energético de la urbanización.

Para la resolución del balance energético de edificios existen diferentes métodos de cálculo, que serán analizados a lo largo del Capítulo 3. A modo de introducción se puede decir que se dividen en: estáticos y dinámicos. Entre ellos la diferencia estriba en los datos climáticos necesarios (mensuales u horarios) y el tipo de resultado obtenido (balance medio mensual energético o resultados horarios del balance). Los métodos estáticos y dinámicos, también son conocidos como simplificados o detallados. En los métodos dinámicos de simulación, hay que introducir todos los parámetros climáticos enunciados anteriormente, incluyéndose estos datos en los ficheros TRY (Test Reference Years) o TMY, compuestos por datos horarios climáticos (Lund H. 1985 y Argirou, A. 1999). En el Anexo D se definirán con mayor amplitud los métodos de simulación simplificados y detallados.

Con cualquiera de estos métodos se podría obtener el consumo energético de una urbanización, considerando edificio a edificio. Los resultados proporcionarán sólo información numérica, pero no indicarán si está bien diseñada o no. Para ello hay que recurrir a la definición de una ‘urbanización de referencia’ que contendrá diferentes ‘edificios de referencia’, sirviendo ésta de patrón comparativo.

Mediante esta comparación se puede analizar la bondad de un diseño urbano desde el punto de vista energético.

Respecto a la urbanización de referencia⁴ habrá que definir los parámetros generales de ésta, que son:

- Orientación de calles, (incide en la posición de los edificios).
- Anchura de la red vial y retranqueos, (condicionan el sombreado producido entre edificios).
- Densidad de ocupación y reservas dotacionales según Ley 1/1992, (influye en el factor de forma y en la mayor o menor dispersión de los edificios).

⁴ No es simple la decisión para utilizar una referencia construida de un modo u otro, sea para la distribución de los edificios, sea para la caracterización de cada uno de ellos. Asimismo, la definición de una única referencia o dos extremas: óptima y mínima, no es simple. Considerando que el contexto – por ejemplo la edificabilidad – crea fuertes condicionantes siendo problemático definir un “origen” absoluto. En el Capítulo 4 se insistirá en este tema.

- Tipologías de los edificios de la urbanización, (el factor de forma incide directamente en el consumo de energía).
- Distribución de edificios (número, altura, posición), (modifica la sombra arrojada entre edificios).

En cuanto a los edificios de referencia habrá que fijar las siguientes características:

- Factor de forma calculado a partir de la superficie envolvente y del volumen del edificio (MOPT, *Norma Básica de la Edificación NBECT-79, 1992*).
- Nivel de acristalamiento de las fachadas.
- Nivel de aislamiento del edificio, definido por los coeficientes de conductividad límite de los cerramientos fijados por el Código Técnico de la Edificación (CTE-HE1, 2006)⁵.
- Renovaciones de aire estimadas.
- Ganancias energéticas internas previsibles.

Una vez planteado el problema de análisis, conviene una reseña histórica que justifica la necesidad de esta tesis, que implica definir un campo de actuación mayor que el edificio, el proyecto urbanístico.

Hasta que no se produce la primera gran crisis del petróleo en 1973, los gobernantes no son apenas conscientes de la importancia de la dependencia energética, promoviéndose a partir de entonces normativas encaminadas a reducir el consumo de calefacción o refrigeración en los edificios.

En España a raíz de la crisis del petróleo surge en 1979 la Normativa Básica de Condiciones Térmicas de los Edificios (NBECT-79), sustituida por el nuevo Código Técnico de la Edificación (entró en vigor totalmente en el 2007)⁶.

En la NBECT-79 se obligaba a que los edificios contaran con un nivel de aislamiento que era función del factor de forma del edificio, (relación superficie exterior frente a volumen calefactado), y de la zona climática donde se ubica el edificio. El objetivo de esta normativa era reducir el consumo energético incidiendo en uno de los factores que más importancia tiene en el balance energético.

Esta norma no tenía en cuenta la captación solar del edificio, la cual reduciría las necesidades de calefacción.

En el nuevo Código Técnico de la edificación se fija de forma similar unos valores máximos de conductividad térmica de los cerramientos según las zonas climáticas, incluyendo como novedad la limitación de la captación solar máxima para verano.

⁵ Un cambio en la normativa aplicable no implica modificación en la metodología sino en el valor de alguno de los parámetros establecidos en la misma.

⁶ En fase final de realización de la tesis se actualizó la normativa sobre aislamiento en la edificación, denominada CTE que fue publicado en el BOE de 28 de marzo de 2006 RD 314/2006, está normativa sustituye a la NBECT-79.

Una vez olvidada la crisis de 1973, vuelve a perder peso el precio de la energía reduciendo su efecto por la inflación por lo que se vuelve a olvidar el aprovechamiento solar nuevamente en el diseño del edificio.

Sin embargo, en la última década del siglo XX, el problema medio ambiental exige políticas de reducción de las emisiones de CO₂. Es evidente que a esta reducción se llega por dos vías: la sustitución de energías fósiles por energías renovables y el ahorro de energía. Ambas opciones son pues, una contribución equivalente a las reducciones de emisiones siendo una medida indirecta de fomentar la preocupación por el diseño de edificios de bajo consumo energético.

En Europa, los edificios son los causantes del 22% de las emisiones de CO₂ (Colombo. R et al, 1995). A la vista de este impacto, aparece la Directiva Europea 93/76 de la CEE, en la que se plantea la Certificación Energética de edificios, como estímulo del sector para mejorar el diseño teniendo en cuenta el ahorro energético.

Los diferentes países de la Unión Europea tenían que encauzar sus normativas para cumplir en 1995 el mandato de la directiva CEE 93/76. El resultado ha sido que no se han llegado a desarrollar plenamente los apartados de ésta. En España por ejemplo sólo se ha cumplido uno de los apartados. En concreto el que hace referencia a la contabilidad individualizada de consumo de energía en sistemas colectivos a través del Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE, 1998). En cuanto a la certificación, tan sólo las comunidades del País Vasco y de Castilla y León han puesto en marcha los procesos de certificación.

En Aragón en el año 2001 comenzó un proceso de certificación experimental que terminó en el 2003 con una propuesta de modelo de aplicación en la comunidad.

En Europa, una vez observada la falta de cumplimiento de la directiva CEE 93/76 se ha desarrollado una nueva directiva más amplia y concreta. Esta nueva directiva es: ‘Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al rendimiento energético de los edificios’. La fecha de presentación es el 16/4/2002 y complementa al borrador de fecha 11/5/2001.

El objetivo de la nueva directiva sigue siendo la preocupación por el medio ambiente, planteando como una solución la mejora del consumo o el ahorro energético en los edificios, por lo que se entrará en una nueva etapa en la que la Arquitectura Bioclimática y el Urbanismo Energético promuevan modificaciones en el pensamiento de los arquitectos y en el diseño que la nueva sociedad les demande.

La Arquitectura Bioclimática o, preferiblemente, Arquitectura Racional o Eficiente, es aquella que adapta el edificio al clima en el que se va a construir, teniendo como objetivo la reducción de la demanda de energía auxiliar y la mejora del confort. Como una extensión se podría definir el Urbanismo Energético como aquél que mediante la distribución espacial de los edificios y el análisis colectivo de las demandas de energía, tiende a potenciar dicha reducción. De un lado, la eficiencia en los procesos de acondicionamiento mediante el potencial que proporciona el factor de escala y de otro el aprovechamiento de la energía solar mediante la orientación de las calles y la eliminación de sombras arrojadas entre edificios o la anulación de sus efectos cuando se produce sobrecalefacción, son los medios de obtener esta reducción en la demanda de energía auxiliar.

Como ha demostrado el tiempo, es la preocupación por el medio ambiente la que ha contribuido a la evolución de los edificios más que el ahorro energético. Si el precio de la energía hubiese aumentado por nuevas crisis o por su escasez, hubiera sido, probablemente, este mayor coste el que exigiría el planteamiento de las nuevas normativas en los países.

En España dentro de este fuerte cambio acelerado que está surgiendo se ha procedido a la modificación de la norma sobre condiciones térmicas denominada Código Técnico de la Edificación (CTE, 2006) y a la implantación de la Certificación Energética de Edificios (RD 47/2007) por transposición de la directiva europea 91/2002 sobre eficiencia energética de los edificios.

El nuevo CTE supone una mejora al exigir a los edificios mayor nivel de aislamiento respecto a la exigida en la NBE-CT-79 (a la que sustituye) y además considera su diferenciación por fachadas en función del aprovechamiento solar de éstas.

A través de la Certificación Energética se va a calificar los edificios por su eficiencia global (aislamiento, sistemas auxiliares, ...), esta nueva normativa pretende mejorar los edificios de nueva construcción e informar a los ciudadanos sobre el valor de eficiencia que alcanza el edificio.

Hay que mencionar también sobre la evolución de la financiación a proyectos de investigación en el marco de la edificación en Europa. Los programas Joule, Thermie, Save y Altener de la Comisión Europea⁷ permitieron llevar a cabo proyectos llamados demostrativos, en los que el objetivo era realizar acciones concretas en edificios singulares en los que se redujese el consumo de energía mediante la Arquitectura Bioclimática o incluyendo sistemas activos. Estos proyectos sirvieron localmente como hitos demostrativos de la viabilidad de estas tecnologías. En contadas ocasiones fue más el planteamiento urbanístico el objetivo, como es el caso de Barrio Goya posteriormente analizado en esta tesis.

Merece mención especial uno de los proyectos demostrativos más interesantes que se ha realizado en la edificación. Ha sido el trabajo realizado por la International Energy Agency dentro del programa ‘Solar Low Energy Houses of IES Task 13’ (1995). En este proyecto se construyeron 15 viviendas de diferentes tipologías dispersas por Europa, Estados Unidos y Japón. La monitorización de estos edificios (Thomsen K.E. et al, 2005) ha permitido comprobar que el ahorro medio de energía obtenido es de un 60% respecto a viviendas estándar de los diferentes países, gracias en gran medida al aprovechamiento solar, así como al impacto de diferentes innovaciones y técnicas constructivas.

Una vez demostrada la viabilidad de estos diseños basados en la adaptación al lugar, es el momento de volver a diseñar los edificios pensando en que están sometidos a un clima y que deben ser específicos de cada localización. Un edificio que aprovecha la captación solar no sólo reduce el consumo energético, además presenta mayor confort que el edificio no diseñado conforme al clima.

En el caso más general los edificios deben estar orientados al sur, distribuyendo los espacios vivenciales al sur y los no vivenciales al norte (huecos de escaleras, baños, garajes, etc.). Sin embargo, las opciones de un aprovechamiento pasivo en una trama urbana convencional son escasas. De ahí que el paso natural para potenciar aprovechamientos generalizados es incidir en el proyec-

⁷ Y posteriormente el 5º, 6º y 7º Programas Marco en varios de cuyos subprogramas se inciden en aspectos de sostenibilidad (incluyendo diversos enfoques en el marco ciudadano de las exigencias ambientales/energéticas). La característica fundamental de estos subprogramas es la dimensión de cada proyecto. Por ejemplo, el proyecto Renaissance dentro del programa Concerto incorpora acciones urbanísticas como las iniciadas en Residencial Parque Goya, en el ámbito de tres ciudades europeas, Bratnell, Lyon y Zaragoza, con una inversión total que supera los 10 millones de euros. En Zaragoza la actuación, inspirada en la experiencia de Parque Goya, supone una inversión de la UE diez veces superior a la realizada en Barrio Goya.

to urbanístico. El diseño de la trama urbana debe facilitar que la mayor parte de los edificios disponga de fachadas con orientación sur y que no se provoque sombreado que reduzcan la captación solar, realizando para ello una adecuada limitación de la separación de calles y de la altura de los edificios.

Así, los más denodados esfuerzos pueden conducir a resultados más bien magros en el diseño de un edificio, si inciden en él características restrictivas tales que el aprovechamiento de la energía solar sea poco menos que testimonial como muestra el ejemplo que recogemos en el párrafo siguiente. Por el contrario, el establecimiento de un marco general urbanístico permite adecuar las condiciones de la mayor parte de sus edificios de modo que el potencial del diseño bioclimático sea máximo.

En Zaragoza la urbanización Parque Goya, construida la primera fase, y ya con una evaluación experimental que se recoge en el Capítulo 4, y finalizándose la segunda y tercera fases, es un adecuado ejemplo, o la futura urbanización de Valdespartera, con casi 10.000 viviendas VPO, construida a la luz de la experiencia de Parque Goya, es otro ejemplo de una aproximación satisfactoria a lo que podríamos llamar Urbanismo Sostenible, en cuanto a la componente energética de los edificios.

La Arquitectura Bioclimática permite optimizar el diseño de un edificio pero la incidencia en el consumo energético neto es función del resto de elementos que participan en este concepto.

La figura siguiente refleja esta circunstancia: si consideramos ubicado en Zaragoza un edificio de 24 viviendas y 4 plantas que cumple estrictamente la norma NBE CT79, obtenemos un consumo de energía de 112 kWh/ m²año para calefacción y ACS, a partir de rendimientos medios del equipo auxiliar, más unos 38 kWh/m² año de necesidades en refrigeración, cada vez más frecuentemente atendidos mediante consumo energético en un equipo de acondicionamiento.

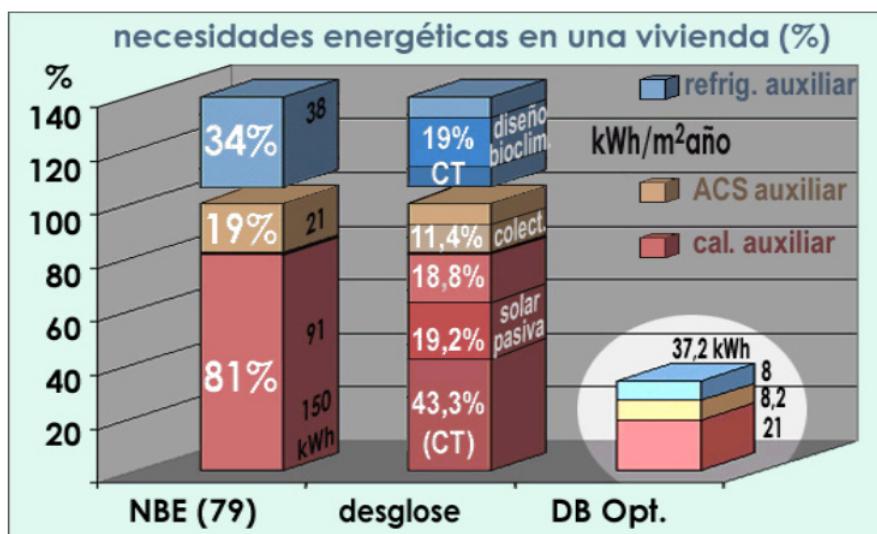


Figura 1.3. Desglose de los ahorros potenciales en el consumo de energía de un bloque de viviendas. (Fuente: Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza).

Los consumos anteriores quedan reducidos significativamente cuando se aplican mejoras que, si consideramos que el diseño bioclimático es sinónimo de racionalización energética, se aplicarían en Arquitectura Bioclimática. Tenemos que la demanda de (112+38) kWh/ m²año queda reducida

a $(29,2+8)$ kWh/m²año, lo que implica una reducción del 73,9% si consideramos sólo calefacción o del 75,2% si se ha considerado también la refrigeración.

Dado que la Norma NBE CT79 se ha sustituido por el nuevo Código Técnico de Edificación estableciéndose criterios más exigentes en cuanto a aislamiento y otros aspectos del diseño, la figura desagrega los efectos del ahorro, de modo que imputa una parte a las nuevas condiciones y el resto a las acciones específicas de diseño o por el aporte de colectores solares. Debe quedar claro, con todo, que cuando hablamos del potencial ahorro del diseño bioclimático, éste está condicionado por la envolvente y por el entorno.

Y este efecto puede ser muy importante. Es la situación, tomada de un caso real, que recogen las alineaciones **a** y **b** de la figura 1.4, la primera corresponde a la situación que definía el plan parcial, mientras que la segunda refleja una opción ideal en la que se habría actuado a nivel de plan parcial.

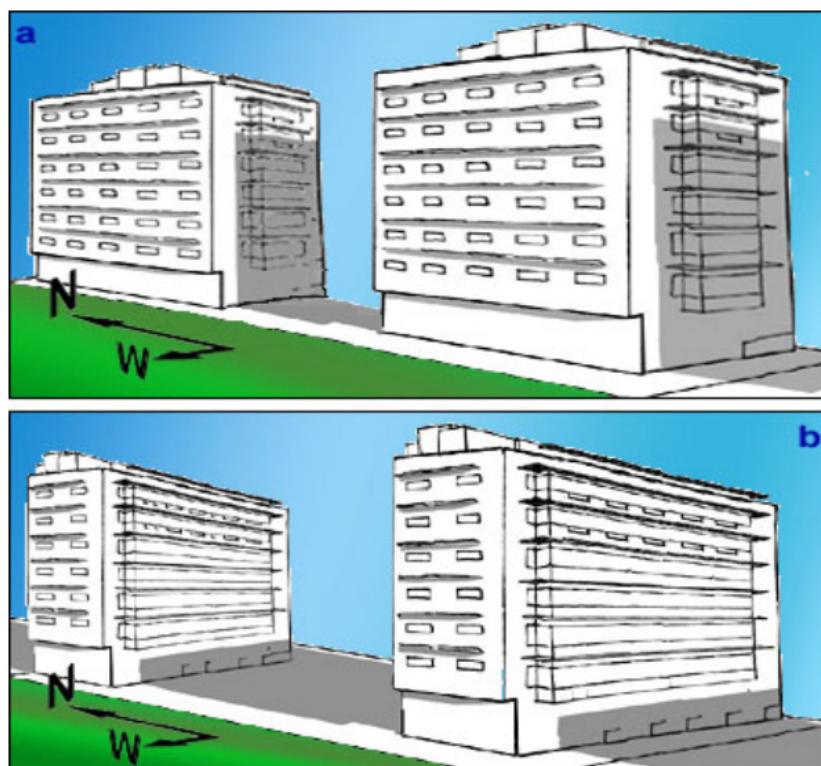


Figura 1.4. Dos posibles configuraciones de distribución de edificios en un área urbana.
(Fuente: Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza).

Las diferencias quedan evidentes en la tabla siguiente: De un lado la mayor sombra, por la reducida distancia entre bloques (configuración a), reduce la posible captación solar en la fachada sur en invierno, dejándola reducida prácticamente a las dos últimas plantas. De otro, la alineación Este-Oeste de dicha configuración conduce a que numerosas viviendas estén orientadas al oeste, orientación claramente negativa.

Por el contrario la disposición del caso b permite que la mayor parte de las viviendas tengan orientación sur y la distancia entre bloque posibilita el aprovechamiento solar en la fachada correspondiente.

En definitiva, al incorporar colectores solares en igual medida en ambas configuraciones, el ahorro total es casi cuatro veces mayor en el caso de la configuración b que refleja unos 20 kWh/m²año menos en sus necesidades de ACS y calefacción.

	kWh/m ² año	kWh/m ² año	kWh/m ² año
Calefacción	52,8	45,3	25,0
ACS	21,0	12,6	12,6
TOTAL	73,8	57,9	37,6
Referencia	Configuración "a"	Configuración "b"	
% Ahorro sobre ref.:	11,50%	49,10%	

Tabla 1.1. Comparación de las dos posibles configuraciones que incorporan diseño bioclimático para el caso particular de un edificio lineal situado en Zaragoza conformado por 24 viviendas distribuidas en 4 plantas orientado al sur-norte o al oeste-este. (Fuente: Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza).

Es evidente que la configuración b supone condiciones más exigentes, en un cierto sentido, a la hora de la distribución del suelo. Sin embargo, en la planificación de una urbanización con algunos cientos o miles de viviendas hay margen suficiente, si se combinan mayores alturas en unas zonas o la distribución de zonas verdes, para separar los bloques de modo que la fachada sur esté ampliamente soleada en invierno. En el caso estudiado aquí, frente a la distancia de 10 m que se han establecido, serían necesarios algo más de 40 m dado que la altura del bloque es 23 m y lo recomendable es unas 2 veces esta cota máxima.

Esta redistribución de zonas verdes es, además, recomendable para una mejor actuación sobre el microclima que afecta a cada edificio como muestran resultados empíricos o de simulación, como los de Akbari H. (1992) que obtuvo en Florida y Sacramento que incrementar el área verde en una zona urbana puede reducir el consumo del aire acondicionado en un 40 o 50% (un árbol por casa reducía el consumo un 14-24% mientras que tres árboles por casa lo reducían en un 17-54%). La temperatura máxima diaria se redujo en aproximadamente 6°C, mientras que las temperaturas nocturnas se incrementaron en 2°C. Se ha probado así mismo que la distribución de las zonas verdes es más efectiva que su concentración en área específica. Es significativo el hecho que tan solo una tercera parte del ahorro mencionado anteriormente se debía al sombreado sobre las fachadas. El resto tiene su origen en el efecto de evapotranspiración de los árboles y el consiguiente descenso de las temperaturas. Shashua-Bar M. et al (2003) estimaron que para zonas cálidas y secas el uso de vegetación en las zonas urbanas podría reducir la demanda de refrigeración de los edificios hasta en un 20% que puede ser todavía mayor para edificios de baja altura como indican simulaciones realizadas para zonas de la ciudad de Sacramento.

Un edificio diseñado bajo criterios de Arquitectura Bioclimática, y con un emplazamiento adecuado, puede reducir el consumo de calefacción⁸ en un 60% con sobrecostes de construcción reducidos (en torno a un 10%), resultados ambos obtenidos del proyecto Thermie n°BU 178/95 'Barrio Goya'. La ventaja, según se ha señalado, no es tanto el ahorro energético como la contribución a la mejora del medio ambiente con menor emisión de CO₂ y aumento del confort en las viviendas.

⁸ Referido a un consumo medio en un edificio sin medidas ni aprovechamientos especiales.

Si se tiene en cuenta, como indica la tabla adjunta, que en España el consumo de energía en 1999 en los hogares suponía un 50 % del total de la demanda, queda claro el efecto que puede suponer el ahorro antes citado en el consumo energético por familia. Si se considera una tasa de sustitución y ampliación del parque de viviendas en torno al 5% anual, mantener una actuación de estímulo al desarrollo de planes urbanísticos que faciliten la incorporación de edificios con criterios bioclimáticos puede resultar, en sólo 10 años, la medida más importante en el tema energía - ambiente, por su efecto acumulativo, invirtiendo la tendencia que muestra la tabla 1.2.

Año	Calefacción	A.C.S.	Cocina	Electrodomésticos	Iluminación	Aire acond.	Total kWh	
1990	3804 (44,2%)	1695 (19,7%)	1041 (12,1%)	1403	(16,3%)	620 (7,2%)	-	8606
1999	5046 (49,3%)	1893 (18,5%)	911 (8,9%)	1617	(15,8%)	747 (7,3%)	20,5 (0,2%)	10234

Tabla 1.2. Distribución del consumo de energía por hogar en España, en kWh/año, en paréntesis el % respecto al consumo total. (Fuente: INE, GEE).

La importancia de la orientación permite obtener ahorros energéticos considerables como muestra el análisis sobre la figura 1.4. En cascos urbanos consolidados la orientación de los edificios va a estar marcada por la distribución de las calles, no pudiendo en la mayor parte de los casos reorientar los edificios.

En las nuevas actuaciones urbanísticas desarrolladas a través de Planes Parciales o Especiales se puede definir una trama urbana rectangular, dotando a las calles de la orientación este-oeste y norte-sur, de tal modo que la mayor parte de los edificios disponga de orientación sur. Un ejemplo de estas actuaciones lo constituye la urbanización Residencial Parque Goya (Zaragoza), la cual ha sido desarrollada mediante un Plan Parcial que permitió que el 90% de los edificios tuviera su fachada principal orientada al sur. En la figura 1.5 se muestra la configuración de las parcelas de la citada urbanización.

En esta urbanización, el programa Thermie (nºBU 178/95) financió un proyecto del Grupo de Energía y Edificación en el que ha analizado los resultados de 3 edificios de diferentes tipologías mediante la monitorización continua durante 2 años consecutivos. Estos resultados han permitido obtener algunas de las conclusiones que esta tesis plantea.

Habitualmente los Planes Parciales que desarrollan nuevas áreas urbanas no definen cómo deben ser los edificios desde el punto de vista energético, limitándose a concretar la edificabilidad, la altura de los edificios u otros parámetros urbanísticos. Sin embargo, esta figura puede también obligar a los arquitectos a diseñar los edificios bajo criterios de Arquitectura Bioclimática, estableciendo el Plan Parcial una serie de requerimientos como podrían ser:

- Porcentaje diferenciado de acristalamiento por fachadas.
- Uso de elementos de captación solar pasiva (galerías acristaladas, invernaderos, muros Trombe, etc).
- Uso de captadores solares térmicos.
- Aumento del nivel de aislamiento de los cerramientos del edificio.
- Mejora de carpinterías para reducir las infiltraciones.

- Protecciones solares.
- Sistemas auxiliares de alta eficiencia.
- Incorporación de renovables a la producción local de electricidad.

Siguiendo las indicaciones planteadas en los diferentes Planes Parciales, los edificios así diseñados reducirían el consumo energético y por tanto esta figura del planeamiento podría permitir a los municipios realizar actuaciones urbanísticas conscientes con el medio ambiente.

El primer caso identificado en España en el que sobre una gran área urbana se han introducido condicionantes normativos de Arquitectura Bioclimática es el Plan Parcial de Residencial Parque Goya (Zaragoza, 1994). En dicho documento, en el apartado de Ordenación de Regulación, se introdujeron algunos de estos condicionantes. En el Anexo C se incluye una copia del apartado específico de requerimientos de aprovechamiento energético de los edificios.



Figura 1.5. Distribución de parcelas en la urbanización Residencial Parque Goya de Zaragoza. En el diseño urbanístico se incorporaron criterios de ahorro energético.

En los últimos años en España se están realizando grandes actuaciones urbanísticas incorporando como objetivo el diseñar urbanizaciones que fomenten el aprovechamiento solar con unas distribuciones adecuadas de los edificios y limitaciones en alturas para evitar sombreados.

En un ámbito geográfico próximo se encuentran las siguientes:

- Residencial Parque Goya (Zaragoza, 1996-2005) actuación que permite construir 3.500 Viviendas de Protección Oficial. Promotor Diputación General de Aragón.
- Sarriguren (Navarra, 2002-2006) urbanización para albergar 5.000 Viviendas de Precio Tasado. Promotor VINSA - Diputación Foral de Navarra.

- Polígono Albajar (Hueca, 2001-2005) actuación para construir 500 Viviendas de Protección Oficial. Promotor Diputación General de Aragón.
- Valdespartera (Zaragoza, 2002-2010) ampliación de la ciudad al sur para construir 9.600 Viviendas de Protección Oficial. Promotor Ayuntamiento de Zaragoza.
- Tudela (Navarra, sin fecha comienzo) creación de una ecociudad apoyada en un proyecto europeo Concerto para el desarrollo de Eco-City, el número aproximado de viviendas rondará las 1.000 (libres y VPO). Promotor Ayuntamiento de Tudela.
- Cuarte de Huerva (Zaragoza, 2008) construcción de 1500 viviendas (de ellas 500 VPO) para las que se plantea un horizonte de cero emisiones en función de aportes renovables, sistemas de trigeneración y diseño bioclimático de los edificios con exigencias que superen el CTE.

Estas grandes actuaciones tienen, en su mayor parte, como objetivo añadido facilitar que las personas jóvenes puedan adquirir su primera vivienda al ser de precio protegido.

El éxito de los resultados de ahorro energéticos obtenidos en la primera fase de Residencial Parque Goya, ha animado a las administraciones a ejecutar este tipo de desarrollos urbanísticos a través de Planes Parciales o Especiales en los que una vez definidas las parcelas y las limitaciones urbanísticas fundamentales, se plantean concursos para la adjudicación del suelo a cooperativas (principalmente) que deben cumplir los apartados específicos del Plan Parcial y un Pliego de Condiciones en los que se incluyen conceptos de Arquitectura Bioclimática para reducir el consumo energético.

Como ejemplos, cabe destacar el Plan de Viviendas de Navarra de 2005 en el que se incluye como pautas el diseño de viviendas bioclimáticas. También, ayuntamientos como los de Zaragoza y del Valle de Elorz (Navarra) entre otros más están planteándose la redacción de ordenanzas para que en las viviendas se incluyan aspectos de ahorro energético y condicionantes bioclimáticos. En particular, el de Zaragoza incide, además, en la regulación urbanística y recoge un apartado específico correspondiente a los planes parciales en línea con el análisis desarrollado en esta tesis.

En las figuras siguientes se muestran algunas imágenes del aspecto final de los edificios y de la urbanización construida en Residencial Parque Goya (Fase I, 1.158 VPO), en estos momentos se están desarrollando las Fases II y III que completarán las 3.500 viviendas. En la figura 1.5 se muestra en planta la división en parcelas de la urbanización.

Las fotos permiten apreciar que un Pliego de Condiciones con consideraciones Bioclimáticas no implica una arquitectura repetitiva e invariante.



Figura 1.6. Edificio parcela P-9 Residencial Parque Goya (Fase I). (Fuente: GEE).



Figura 1.7. Bloque de 178 viviendas en manzana alargada orientado hacia el sur con patio interior en Residencial Parque Goya (Fase I). En la primera foto se muestra la fachada principal sur y el pequeño lateral este, mientras en la inferior se aprecia el patio interior con igual tratamiento de acristalamiento en la fachada sur y este que las que dan a las calles circundantes. (Fuente: GEE).



Figura 1.8. Edificio parcela P-11 Residencial Parque Goya (Fase I). En la imagen de la izquierda se muestra la fachada sur y la otra corresponde a las fachadas norte y oeste del edificio. (Fuente: GEE).



Figura 1.9. Vista edificio lineal con fachada principal orientado al sur en Residencial Parque Goya (Fase II). El solar descampado ubicará una zona deportiva comunitaria (Fuente: GEE).



Figura 1.10. Unifamiliares parcela PU-7 en Residencial Parque Goya (Fase I). (Fuente: GEE).



Figura 1.11. Unifamiliares parcela PU-9 en Residencial Parque Goya (Fase I). (Fuente: GEE).

En la figura 1.12 muestra un esquema de la urbanización de Valdespartera (9.600 VPO) en Zaragoza.



Figura 1.12. Vista virtual 3D de la urbanización de 9.600 VPO de Valdespartera en Zaragoza. (Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza).

En la figura siguiente 1.13 se muestra uno de los planos iniciales de la Ecociudad de Sarriguren (Navarra), se puede comprobar los espacios libres con que cuenta la urbanización diseñada por el grupo de arquitectura Taller de Ideas.

La nueva planificación une dos conceptos:

- El urbanismo energético.
- Las reglas que desarrollen conceptos de Arquitectura Bioclimática en los edificios.

Con la coordinación entre ambos conceptos se colabora en el objetivo de la reducción de las emisiones de CO₂, y lo que es más importante, a que sea posible un ahorro económico – energético importante para los usuarios a la vez que se alcanza un alto grado de confort térmico en los edificios.

Este tipo de actuaciones no ha hecho más que comenzar. Por ejemplo, en Pamplona se piensa construir en pocos años un total de unas 19.000 viviendas en las que se realizarán planes parciales para desarrollar estas nuevas áreas urbanas.

La oportunidad de esta tesis queda manifiesta a la vista de lo anterior dado que su finalidad es, como ya se ha indicado, definir los criterios y diseñar un método de cálculo apropiado para la evaluación energética de un proyecto urbanístico, que pueda ser utilizado en la fase de diseño permitiendo discernir objetivamente desde el punto de vista energético cuál es la mejor solución entre dos planteamientos cualesquiera diferentes, e incidir subsiguientemente en la normativa que la posibilite.

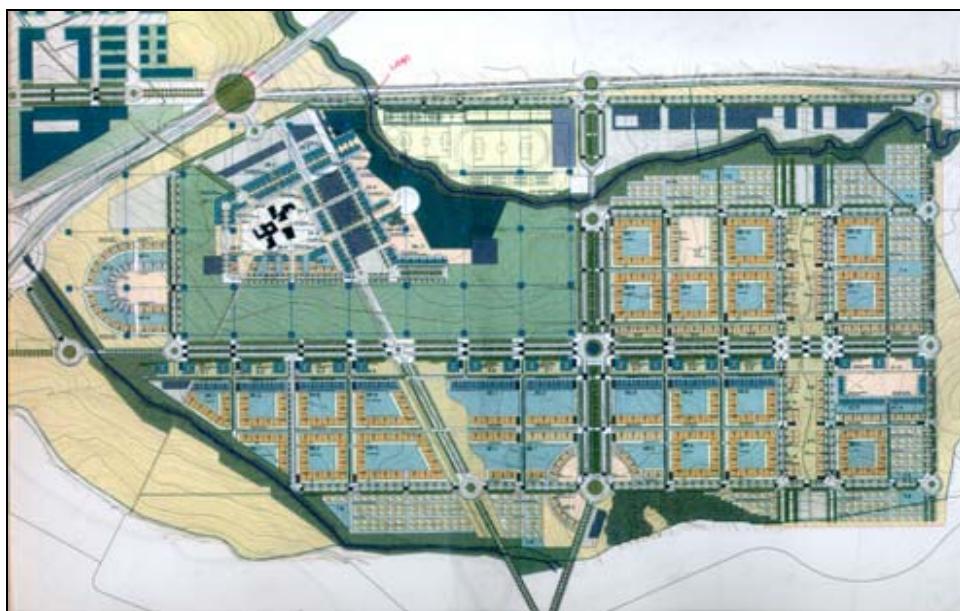


Figura 1.13. Configuración inicial de la Ecociudad de Sarriguren (Navarra). (Fuente: Taller de Ideas).

1.2. Las simulaciones energéticas: Estado del arte

Los mayores esfuerzos técnicos en las décadas anteriores se han realizado en el diseño de herramientas de simulación que realizan el balance energético de un edificio, apareciendo en el mercado multitud de programas que realizan estos cálculos con métodos estáticos o dinámicos.

Para validar estas aplicaciones se comparan con diversos programas usados internacionalmente; algunos de los cuales se muestran en la tabla 1.3⁹.

⁹ Pueden mencionarse además los programas (Lider y Calener) que el CTE o la normativa de certificación han puesto a disposición de los usuarios por su puesta en servicio cuando la tesis estaba ya completada.

Método	Nombre
Estáticos <i>(cálculo medio mensual)</i>	LPB3 y LPB5 Método 5000 Admittance Method
Dinámicos <i>(cálculo horario)</i>	DOE (USA) ESP TSBI3 (Dinamarca) PASSPORT –Plus (UE) SERI-RES TRNSYS (UE, USA) HTB2

Tabla 1.3. Software para cálculo del balance energético de edificios (Lewis O. et al, 1999)

Entre los programas de cálculo dinámico de mayor reconocimiento se podrían enumerar los utilizados por la International Energy Agency (IEA), encargándose Lomas K.J. et al (1997) de realizar un estudio en el que se evaluó la validez y facilidad de uso de aplicaciones dinámicas reconocidas.

Los programas presentan mayor o menor complejidad en función del propio método empleado, siendo más difíciles de manejar los que utilizan modelos detallados o dinámicos.

En estas aplicaciones se permite introducir para cada acristalamiento del edificio el sombreadamiento externo que le afecta, por lo que para simular una urbanización se debe introducir edificio a edificio teniendo en cuenta para cada uno de ellos los sombreadamientos particulares que existen. Este modo de trabajo no es operativo si el número de edificios es alto, con tipologías y orientaciones diferentes y si se pretenden realizar variaciones de configuraciones urbanas, el tiempo de modelación es muy dilatado. Tampoco son adecuados para una modelación que pretenda una optimización pues los propios programas son muy poco adecuados a la simple optimización de un edificio. En esencia permiten realizar evaluaciones o auditorias de un proyecto dado, por ejemplo la realizada sobre el proyecto urbanístico de la Ecociudad de Sarriguren de Navarra (Turégano J.A. et al, 1999)

Son precisamente, estas circunstancias las que hacen especialmente deseable una modelación de edificios a escala urbana cuyo análisis energético pueda realizarse de forma sencilla, disponiendo los edificios espacialmente en la urbanización y a la vez sea flexible a la hora de realizar variaciones (orientación, separación de calles, etc) que permitan encontrar una solución optimizada. Estas nuevas aplicaciones informáticas son las que se necesitarán para el análisis urbanístico energético, y para las que se plantea un modelo de cálculo en esta tesis, con un desarrollo concreto, la aplicación URSOS en su versión β, puesto recientemente a punto por el GEE de UZ para el IDAE.

A continuación se hace una revisión del estado del arte sobre métodos o programas de cálculo que evalúan el consumo energético (calefacción y refrigeración) de un conjunto de edificios de una urbanización.

Como antecedente y dentro de los trabajos financiados por la European Commission, se realizó un estudio para modelar el impacto ambiental que provocan las diferentes tipologías en urbanismo.

El nombre clave de este proyecto es ZED (contract nº RENA CT940016) y fue desarrollado por Steemers K et al (1996).

En este trabajo se analizaron seis tipologías de trama urbana con diferentes edificios (torres, bloques lineales, manzanas cerradas), la superficie de terreno ocupada y la construida para cada tipología es idéntica, modificando en cada caso la altura de los edificios. En la figura 1.14 se han incluido las seis formas utilizadas.

Para analizar cual era la mejor configuración desde el punto de vista energético se utilizó la herramienta de cálculo LT, con la que se obtenía el consumo de calefacción, iluminación y refrigeración, teniendo en cuenta el sombreado arrojado entre los edificios.

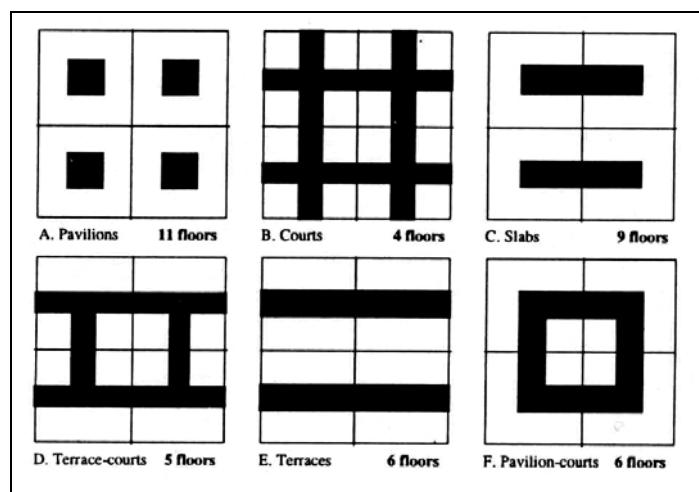


Figura 1.14. Tramas urbanas y edificios analizados por Steemers K et al (1996). En cada unidad de área ocupada se han incluido la misma superficie total construida. (Fuente: Steemers K et al, 1996).

En el cálculo se fijaron diversos parámetros de los edificios (aislamiento, porcentaje de acristalamiento, infiltraciones) para realizar la simulación y que los resultados fueran comparativos.

Como resultado los autores obtuvieron que la mejor configuración era la de los edificios ‘slabs’ (bloque lineal con orientación fachada principal al sur), y el peor de todos los analizados era el tipo ‘courts’ (ver figura 1.14).

Dentro del proyecto europeo Renaissance del programa Concerto, el Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza ha realizado un análisis similar al de Steemers para edificios situados en Zaragoza, obteniéndose mediante simulación con Tsbi3 la demanda de calefacción y refrigeración de diferentes bloques de viviendas con configuraciones y orientaciones diversas. De los resultados que se muestran en la figura 1.15 se obtiene como conclusión, al igual que Steemers, que el edificio lineal orientado al sur presenta menor demanda frente a cualquier otra configuración de bloque u orientación.

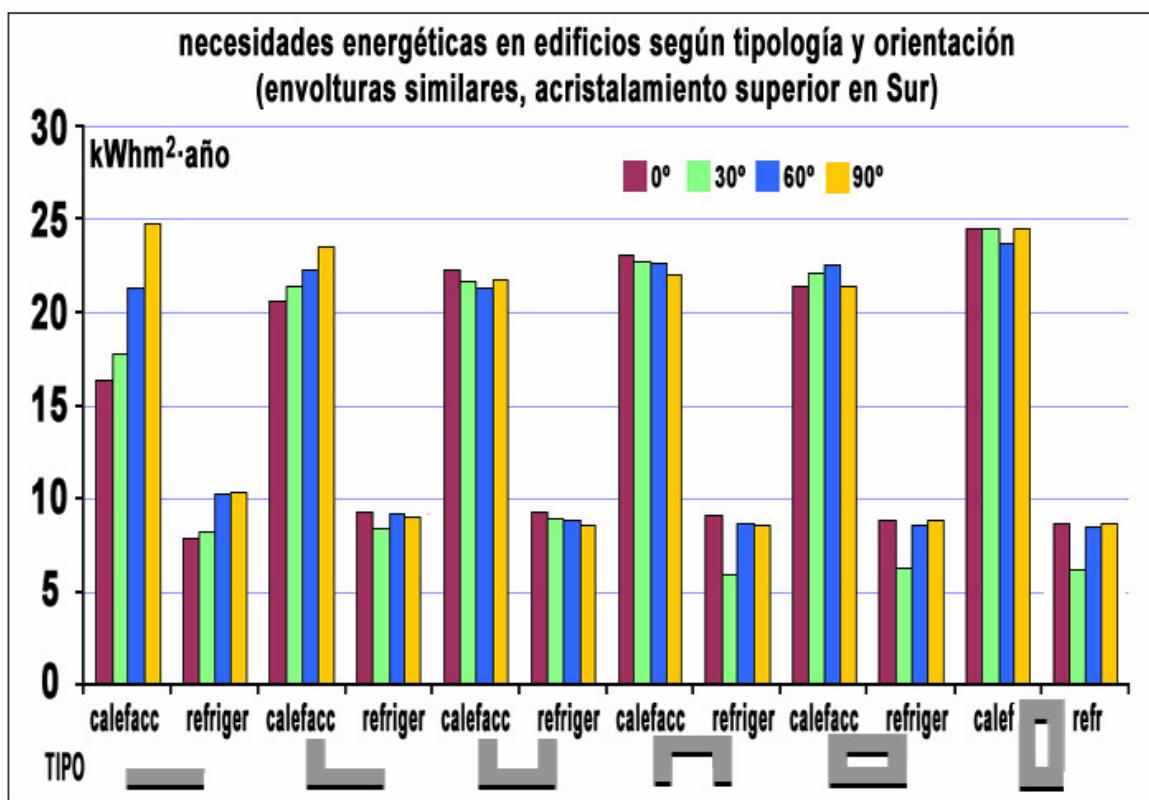


Figura 1.15. Demanda energética anual de calefacción y refrigeración por unidad de superficie (kWh/m² año) para diferentes configuraciones de bloque y orientaciones. El análisis se ha realizado situando los edificios en Zaragoza. (Fuente: GEE).

En un desarrollo posterior, Crowther D. et al (1998), mostraba las posibilidades del ZED en el análisis de la escala urbana.

A partir del trabajo realizado en ZED, Adolphe L. (1996 y 1998) desarrolló el programa ZEIS (Zero Emmission Information System) que ofrecía las siguientes funciones:

- Describir la geometría, tipología e información medio ambiental del proyecto urbano (edificios, calles, zonas verdes,...)
- Análisis espacial y medio ambiental utilizando aproximaciones de modelos simplificados.

Este proyecto permitía integrar los diferentes aspectos del diseño urbanístico facilitando la toma de decisiones desde el punto de vista medio ambiental.

El inconveniente de apoyarse en estos esquemas es la rigidez que pueden imponer en un planteamiento; edificios homogéneos sobre calles paralelas. La realidad es que el equipo de urbanismo trabaja, en general, con otras premisas para las que necesita una determinada flexibilidad y, concretamente, unos grados de libertad que, aplicados de una u otra forma, supondrán resultados diferentes en cuanto a la demanda energética. De nuevo podemos ver la necesidad de una herramienta que facilite la comparación de estos diferentes planteamientos desde el punto de vista energético.

En el análisis energético de edificios existen dos niveles de conocimiento que afectan a la planificación urbanística y a la caracterización del edificio. Mientras que el diseñador urbanístico no conoce los parámetros de los edificios que se ubicarán a posteriori, el calculista térmico de edificios si los conocerá, necesitando cada uno de ellos diferentes herramientas de cálculo. Leclercq P. (1996) plantea esta diferenciación proponiendo el uso del método LEMA en la fase de diseño urbano.

El método LEMA utiliza diferentes programas de cálculo que proporcionan al arquitecto una herramienta de decisión en el diseño urbanístico, las aplicaciones informáticas que utiliza son:

- DIRAD y ERAS, determinan la radiación solar recibida sobre las fachadas de los diferentes edificios analizados.
- MZS, realiza el balance energético de los edificios contabilizando las pérdidas (conducción, renovación de aire) y las ganancias.

LEMA facilita al arquitecto el consumo de energía mensual o anual, permitiendo comparar entre diferentes soluciones urbanísticas. La metodología de la tesis persigue esta comparación, permitiendo unir en la aplicación URSOS (Turégano J.A. et al, 2002) las herramientas de cálculo de radiación y del balance energético con definición de las necesidades de calefacción y de refrigeración. El análisis parte del supuesto de que la energía debe ser uno de los condicionantes del diseño pero no una restricción total del urbanista. Esto supone otros criterios, como la edificabilidad, o el análisis de viales en función del transporte, son también condicionantes por lo que un planteamiento urbanístico no puede sino buscar un determinado equilibrio entre todos ellos. Desde este punto de vista lo que aprecia el urbanista es una herramienta de evaluación que permite contrastar diferentes “borradores” y la importancia de variaciones en cada uno de ellos de forma sencilla y correcta.

Uno de los condicionantes en el cálculo del consumo de los edificios es la determinación del sombreado sobre las fachadas. Existen diferentes herramientas como SOMBRERO (Niewinda A. et al, 1996 y Büchler P. et al, 1998), OMBRE-URBANE (Carbonari A. et al, 1996 y 1998) o Solar-Toolbox (Rudy M, 1998) que determinan la radiación incidente sobre las fachadas de un edificio partiendo de una geometría urbanística.

En Belo Horizonte (Brasil, latitud 20° SUR) Assis E. et al (1998) han desarrollado un método de cálculo de sombreado para limitar la altura de los edificios en las nuevas actuaciones urbanísticas de la ciudad. Con este método la normativa municipal podía asegurar la captación solar y la iluminación (regulación del derecho al sol).

Los parámetros de diseño debían permitir como mínimo 1 hora de soleamiento en la fachada norte del edificio en el solsticio de invierno, mientras que la iluminación para un 80% del año debía ser superior a 150 lux en el horario comprendido entre las 8:00 AM y las 4:00 PM.

La normativa aplicada era sencilla y facilitaba un criterio a los urbanistas que desarrollaban nuevas ampliaciones de la ciudad.

En la figura 1.16 se muestra un esquema simple de los parámetros que limitan la altura de un edificio en función de la anchura de las calles. En la vivienda sombreada se supone que estarían sin sombra las ventanas de la primera planta que se encuentran a 1.2m de separación del terreno.

Aste N. et al (1998) plantearon un método para comparar la bonanza de un diseño urbanístico analizando la radiación solar incidente en las fachadas de los edificios con el programa SunCad y DITec, siendo la mejor distribución aquella que obtuviera la mayor captación en invierno.

Para calcular la existencia de sombras se recurre al método de la proyección estereográfica (acimut – altura solar) (Collado F.J., 1988), comparando ésta con el perfil visualizado desde la fachada de un edificio. Si el sol se encuentra para una dirección determinada por debajo del perfil, existirá sombreado. Este método de cálculo del sombreado es el que se ha implementado en la metodología de esta tesis.

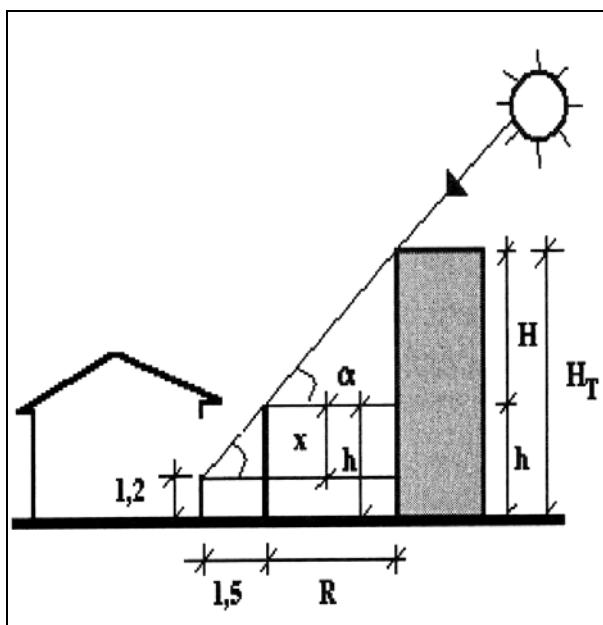


Figura 1.16. Limitación de altura de un edificio para cumplir el derecho al sol recogido en la normativa municipal de Belo Horizonte (Brasil). (Fuente: Assis E. et al, 1998).

Algún autor como Bitan A. (1998), plantea la necesidad de tener en cuenta el urbanismo sostenible partiendo del aprovechamiento solar y de la adaptación al clima en el que se ubican los edificios. En el artículo, Bitan plasma los conceptos que deberían abordarse en la fase de diseño urbanístico, describiendo la necesidad de aplicaciones que determinen el balance energético de los edificios.

En Inglaterra se ha desarrollado el programa EEP (Jones P.J. et al, 1998) que permite realizar auditorías y análisis a escala urbana, sirviendo de ayuda a los urbanistas. El programa EEP está basado en Sistemas de Información Geográfica (GIS) incorporando subprogramas que establecen el consumo energético y las emisiones producidas por los edificios, el transporte y la industria.

La aplicación se desarrolló inicialmente para la ciudad de Cardiff siendo facilitada a otras áreas urbanas para predecir los efectos de las planificaciones futuras ofreciendo modificaciones para mejorar las nuevas actuaciones.

Uno de los cálculos realizados por EEP es el consumo de energía de los edificios aplicando la normativa de condiciones térmicas de Inglaterra. El programa interroga sobre datos muy generales del edificio (grado de aislamiento, uso de doble vidrio, etc). En la figura 1.17 se muestra una pantalla de la citada aplicación.

Dentro de los trabajos realizados Adolphe L. (1999) se encuentra la aplicación MORPHOLOGIC, que permite estudiar la bonanza de un diseño urbanístico teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La pérdida energética del edificio por volumen climatizado (W/m^3). Este indicador es una muestra de la compacidad de un edificio: cuanto más compacta es la tipología constructiva, mayores ahorros energéticos se podrán tener.
- La contigüidad con otros edificios. Por los cerramientos de separación con otros edificios existen menos pérdidas que los que limitan con el exterior. Cuanto menor sea el área vertical exterior de un edificio, el consumo del edificio será menor.
- El último factor tiene en cuenta el aprovechamiento solar de los edificios. Ponderando con mayor puntuación la existencia de acristalamientos al sur, a la vez que se penalizan los sombreamientos sobre las fachadas del edificio.

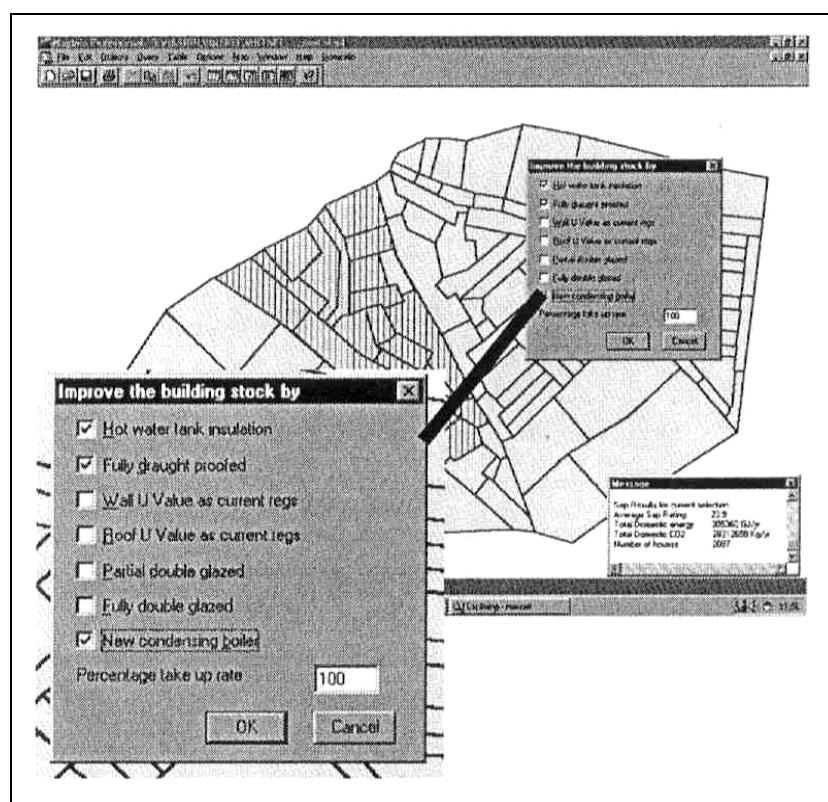


Figura 1.17. Pantalla general del programa EEP, en la que se definen los parámetros térmicos de los edificios. (Fuente: Jones P.J. et al, 1998).

Rogora A. et al (1999) han desarrollado diferentes programas para que los urbanistas tengan en cuenta las posibilidades de la arquitectura bioclimática. Las herramientas que han implementado realizan los siguientes cálculos:

- Evaluación del sombreamiento externo.
- Cálculo de la radiación solar sobre superficies horizontales.
- Evaluación de la iluminación natural.
- Anchura máxima de habitaciones para que tengan suficiente iluminación natural.

Para llevar a cabo la distribución de edificios en un área urbana y que no se produzcan sombras entre los edificios, siguiendo el criterio del derecho al Sol, Capeluto I.G. et al (2003) han utilizado para desarrollar un área urbana en Tel Aviv la aplicación SustArc, en la que debe introducirse la configuración a analizar permitiendo visualizar si existen sombras entre los edificios.

En Portugal Goncalves H. et al (2004) han desarrollado una aplicación informática, bajo el nombre de Proyecto Aclure, permite obtener el consumo de energía de una malla de edificios idénticos a la que puede someter a variaciones de la orientación y de la separación entre los edificios. Además, el programa facilita el cambio de la tipología constructiva que configura la malla, pero no permite mezclar edificios de características diferentes ni definir un espacio urbano irregular.

Chimklai P. et al (2004) han desarrollado la aplicación ‘Albedo Calulator’ para tener en cuenta la reducción de la radiación solar incidente en los edificios por la modificación del albedo en un área urbana debida el efecto de sombras que se provocan los edificios que la configuran.

En la mayor parte de los casos, los diferentes métodos desarrollados en las aplicaciones informáticas no realizan el balance energético de edificios, realizándose en algunos casos cálculos complementarios como el análisis del potencial solar disponible (captación – sombreadamiento).

En los últimos años está surgiendo una preocupación por el confort urbano y el efecto isla en áreas urbanas, siendo los principales factores que los modifican los propios edificios y las sombras que arrojan, la vegetación, las láminas de agua, la orientación y la anchura de las calles. Entre las aplicaciones que se están desarrollando destacan:

- CTTC desarrollada por Shashua-Bar L et al (2002, 2003), permite obtener el efecto que produce el arbolado en zonas urbanas y la reducción de temperatura que se obtiene.
- ENVI-met implementada por Bruse M. (2004), analiza el impacto de la vegetación, el trazado de las calles y su anchura en el confort urbano. Ali-Tourdert F. et al (2006, 2007) realizan diferentes estudios de estos parámetros para un clima cálido y seco con esta aplicación.
- La aplicación AUSSMM TOOL (Tanimoto J. et al, 2004) ha sido desarrollada para estimar el efecto isla que provocan los edificios en sus alrededores, considerando los factores climáticos y los aportes energéticos de los edificios al área en estudio.
- Existe otro conjunto basado en aplicaciones de Computación Fluidodinámica (CFD) que permiten estimar las temperaturas en las zonas urbanas y el movimiento de aire que se produce (Li X. et al, 2005). El modelado de las zonas es muy tedioso y los tiempos de computación son muy elevado, por lo que incluso algunos autores (Robitu M. et al, 2006) las tratan de prohibitivas.

Otro inconveniente de las aplicaciones CFD es que no realizan el balance energético de los edificios, siendo necesario recurrir a utilizar otra aplicación que realiza posteriormente el balance con el microclima obtenido (Mochida A. et al, 2006). Incluso Zhai Z.J. et al (2006) plantean la necesidad de incorporar en futuras aplicaciones de simulación de edificios los métodos CFD.

Esta revisión pone de manifiesto la oportunidad del enfoque de esta tesis al plantear como arranque un método de cálculo simplificado para realizar el balance energético a escala urbana, siendo éste un dato objetivo de comparación entre diferentes diseños urbanísticos.

1.3. Hipótesis y objetivos de la tesis

Esta tesis tiene como objetivo cubrir las necesidades en la planificación urbanística desde el punto de vista del ahorro energético, permitiendo al diseñador tomar decisiones objetivas a la hora de elegir entre diferentes configuraciones de la nueva área a desarrollar.

Si se tiene en cuenta el aprovechamiento solar, una urbanización se puede concebir de tal modo que los edificios estén bien orientados y que se consigan porcentajes de ahorro significativos (en evaluaciones recientes realizadas por el GEE se han encontrado ahorros¹⁰ en calefacción y refrigeración combinadas de hasta un 20%, tan sólo por un buen diseño del entramado urbano y partiendo de un proyecto que optimizaba en parte el diseño. En otros casos analizados el ahorro en calefacción suponía hasta un 30%).

Los objetivos que pretende demostrar esta tesis son que:

- Es posible definir un método simplificado del balance energético de edificios suficientemente preciso que permite analizar rápidamente y con suficiente precisión el consumo de calefacción y refrigeración de un elevado número de edificios situados en una trama urbana.
- El número de parámetros urbanísticos que condicionan el aprovechamiento solar, y que posibilitan el anterior análisis es reducido, pudiéndose definir éstos en un nuevo planeamiento para facilitar un elevado ahorro energético en los edificios.
- Se puede utilizar algún método de cálculo de radiación solar suficientemente aproximado para localizaciones que cuentan con pocos datos experimentales.
- El diseño de edificios debe adaptarse a los condicionantes climáticos, el método propuesto de balance energético debe permitir obtener el grado de aislamiento y las superficies acristaladas de las fachadas correctas para cada clima.
- Todo lo anterior permite una estructura en algoritmos programables que facilitan un proceso de optimización y evaluación de la “calidad” energética de un determinado planteamiento urbanístico en relación con otro definido como patrón con configuración, estructura y características de los edificios previamente fijados.
- La dispersión a partir de variaciones limitadas, implica valores de la demanda localizados en torno a un ‘pozo’ de demanda correspondiente a un mínimo, lo que facilitará la aplicación de una metodología de optimización por aproximaciones sucesivas.

Como hipótesis de trabajo que, por sí sola define la oportunidad de la tesis, asumimos que, en la coyuntura actual, sólo es posible generalizar una optimización energética a nivel urbanístico si ésta es simple de ejecución y responde al modus operandi de los

¹⁰ Este valor, en general, será función del clima, de las condiciones exigidas a cada edificio y del planteamiento urbanístico general.

equipos urbanísticos, habitualmente conformados por técnicos no especializados en el balance energético.

A lo largo de la tesis se realiza la exposición teórica y las validaciones experimentales que conducirán a comprobar la validez de los resultados, en cuanto a los objetivos planteados como tesis.

Capítulo 2

Antecedentes históricos del urbanismo y planificación urbanística

A lo largo de la historia el ser humano ha cambiado la tipología del edificio que lo albergaba y protegía de la intemperie, evolucionando en formas, materiales y necesidades, según iba adquiriendo más conocimientos. No sólo las modificaciones han afectado al edificio sino que también se han introducido cambios en la morfología de los asentamientos, adaptándose éstos a las necesidades de cada época.

Las sociedades primitivas utilizaron cuevas enterradas para protegerse de la intemperie (figura 2.1 y 2.2), en las que de forma natural se mantenían unas condiciones de confort durante todo el año.

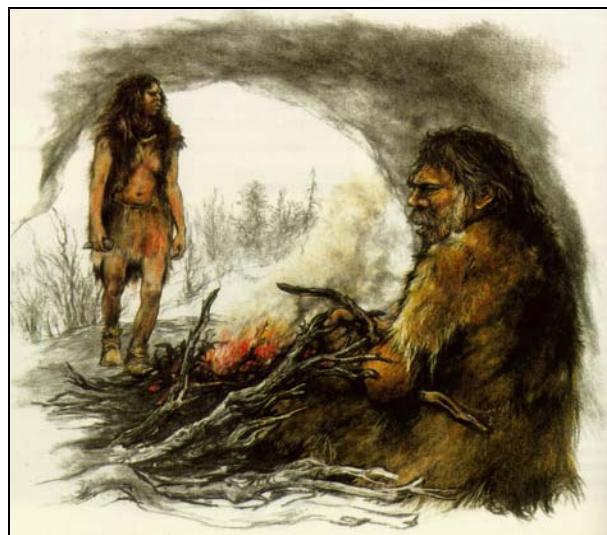


Figura 2.1. El hombre primitivo vivía en cavernas para resguardarse de los factores climáticos adversos.

Posteriormente con el dominio del fuego y las habilidades técnicas que iba adquiriendo se pasó a construir las viviendas en superficie, teniendo éstas diferentes características en función de la climatología del lugar. Un ejemplo de esta evolución lo constituyen los poblados indios de Mesa Verde (figura 2.3) y de Pueblo Bonito (figura 2.4), ambos sometidos al frío intenso del invierno y al clima cálido de la época estival.



Figura 2.2. Cueva para protección del soleamiento en zona árida, utilizada por los indios Moki en Utah. (Fuente: Pearson D., 2000)

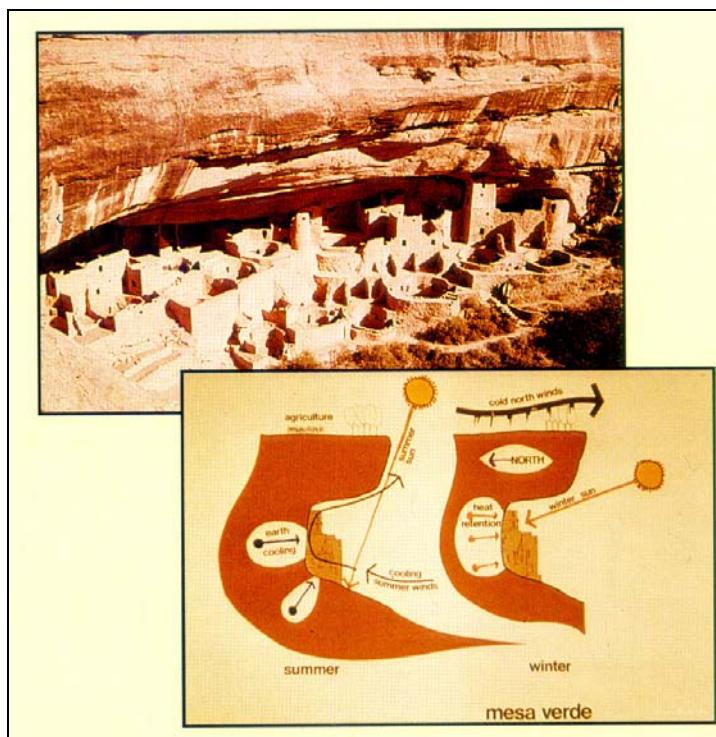


Figura 2.3. Los poblados indios construían sus viviendas al abrigo. En este caso en Mesa Verde la gran bóveda de piedra resguardaba a las viviendas en verano y permitía la captación solar en invierno resguardando al poblado del viento.

Un ejemplo de consideración del derecho al Sol lo constituye el poblado indio Anasazi en Pueblo Bonito, Nuevo México. Todas las viviendas tenían soleamiento durante todo el año al construirse el poblado en forma de grada semicircular. Este asentamiento se muestra en la figura 2.4.

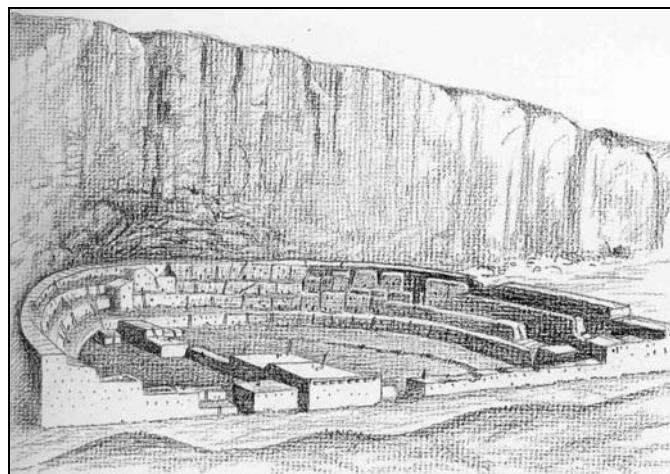


Figura 2.4. Asentamiento indio de Pueblo Bonito (Nuevo México) en el que todas las viviendas tenían asegurado el derecho al Sol al no producirse sombreado entre ellas.

Para cada zona climática la arquitectura tradicional fue desarrollando el mejor edificio posible, existiendo diferencias notables según los condicionantes climáticos. La arquitectura tradicional para una zona cálida y húmeda se muestra en la figura 2.5. El edificio tiene una gran permeabilidad que facilita la ventilación natural existiendo además abundante sombreado.



Figura 2.5. Ejemplo de arquitectura tradicional, situada en una zona cálida y húmeda, permitía la ventilación cruzada y contaba con un gran sombreado. (Fuente: Olgay V, 1998)

Para zonas cálidas y áridas la tradición evolucionó hacia edificaciones semienterradas con pequeños huecos. En la figura 2.6 se representa este ejemplo de arquitectura aplicada a un edificio en Túnez.

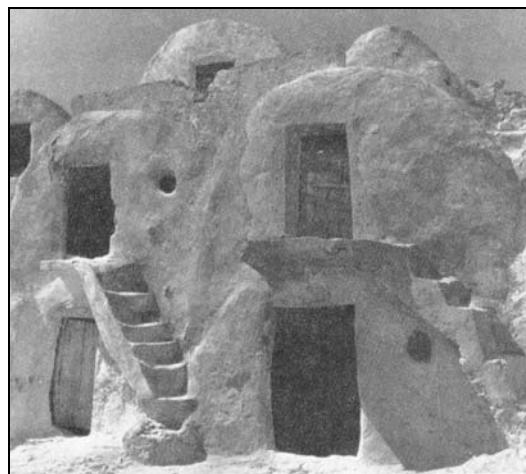


Figura 2.6. Ejemplo de arquitectura tradicional semienterrada en una zona cálida y árida localizada en Túnez. (Fuente: Yañez G, 1998)

Otra tipología correspondiente a climas muy fríos es la que muestra la fig. 2.7, que refleja una vivienda en zona de montaña que aprovecha el calor del ganado para calentar el núcleo central vivencial.

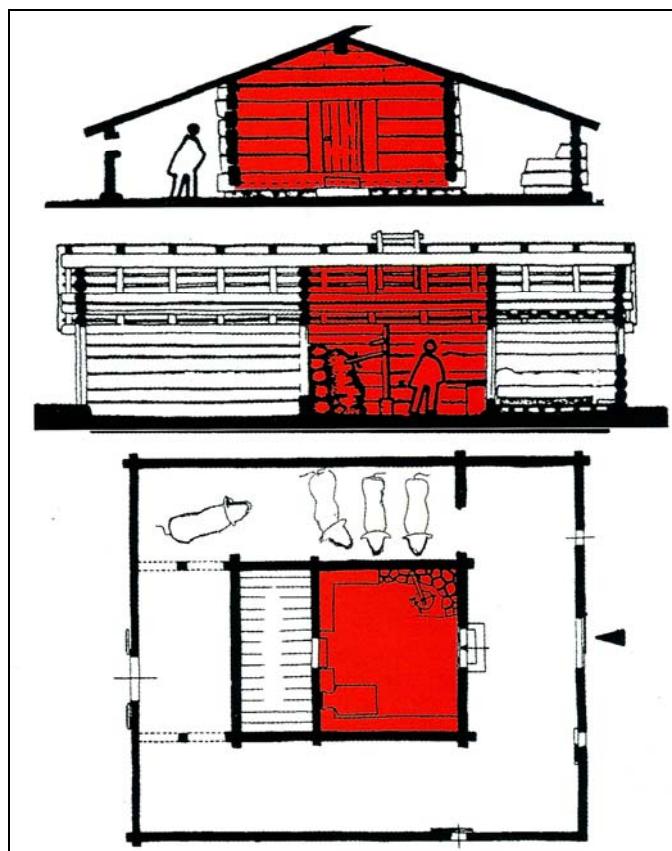


Figura 2.7. Edificio combinado de vivienda y lechería en los Alpes. El establo se sitúa rodeando el núcleo central de la vivienda, encontrándose el ganado protegido de la intemperie y facilita calor al núcleo central vivencial. Las casas suelen estar orientadas al sur o al suroeste. (Fuente: Behling S. et al, 2002)

El paso siguiente al de la formación de las aldeas fue la creación de la ciudad, agrupamiento de viviendas, surgiendo por primera vez el concepto de urbanismo al dotar a los asentamientos de cales que configuraban una entidad, principalmente en torno al palacio o templo religioso.

Las primeras ciudades se solían construir teniendo en cuenta las orientaciones de las calles para permitir la captación solar, disminuir el viento o en climas cálidos protegerse del Sol. Los griegos y los romanos fueron claros ejemplos de estas ordenaciones urbanas.

Un hito histórico en la captación solar fue el descubrimiento del vidrio por los egipcios, siendo usado profusamente por los romanos en los edificios, permitiendo aprovechar la captación solar gracias al efecto invernadero.

El paso del tiempo olvidó este tipo de urbanismo, surgiendo otras necesidades más imperiosas como el afán de defensa en las ciudades medievales. Éstas se configuraban en torno a un núcleo y las calles se trazaban radialmente hasta llegar a completar el espacio limitado por la muralla defensiva.

La herencia del trazado medieval permaneció en muchos núcleos y no se realizaron actuaciones urbanísticas que tuvieran en cuenta el Sol. En este caso primaba la facilidad de comunicación extendiéndose el crecimiento de la forma radioconcentrica de ciudad.

La revolución industrial generó grandes crecimientos en las ciudades que habitualmente partían de la configuración medieval. En este periodo la rápida demanda de gran cantidad de superficie para construir nuevas viviendas fue el origen de una fase de crecimiento desordenado.

El urbanismo no era capaz de responder a las necesidades de la nueva ciudad, y allá donde se realizaba una actuación urbanística no se tenía en cuenta el aprovechamiento solar. Son ejemplos de este tipo de actuación los Ensanches de las ciudades como el realizado por Ildefonso Cerdà (1858) en Barcelona o el de Carlos María de Castro (1864) en Madrid. Uno de los objetivos de estas actuaciones era mejorar las comunicaciones en la ciudad, criterio que ha venido condicionando de manera manifiesta el urbanismo del último siglo.

En el siglo XX, el desarrollo tecnológico permite incorporar a los edificios instalaciones auxiliares de climatización para alcanzar el confort interior mediante el consumo de combustibles. Debido a que el coste económico de estas fuentes era muy barato no existía una preocupación por diseñar edificios que aprovechasen la captación solar, salvo alguna minoría de arquitectos que veían importante la adaptación del edificio al clima.

La corriente mayoritaria de la arquitectura del siglo XX se ha colocado de espaldas al diseño apoyado en el propio clima. Por ejemplo, se han diseñado grandes edificios de oficinas que pueden ser repetidos en cualquier zona climática y en los que se alcanza el confort gracias a los sistemas de acondicionamiento, incluso los edificios se diseñan herméticos.

En los subapartados siguientes se profundiza en los condicionantes de diseño y la adaptación al clima de los edificios según la evolución histórica comenzando desde la aparición de la ciudad. Las referencias históricas se hacen sólo desde el punto de vista del aprovechamiento solar, analizando los condicionantes urbanísticos que potenciaban la adaptación al clima de los edificios.

En los últimos apartados del capítulo se recogen los parámetros que regulan el desarrollo urbanístico y cómo se pueden introducir algunas medidas en los planes parciales para tener en cuenta el

aprovechamiento o la protección solar, propiciando éstas el ahorro energético en las nuevas áreas de crecimiento de los cascos urbanos.

2.1. Movimiento solar

El hombre del Neolítico era un conocedor del movimiento solar, el dominio que poseía lo demostró en algunas construcciones que permitían conocer la estación del año en la que se encontraban, dato fundamental en sus labores agrícolas.

Ejemplo de estas edificaciones lo constituye el observatorio - templo solar y lunar de Stonehenge, situado en Salisbury (Inglaterra). En esta construcción, realizada hace unos 4000 años, el alineamiento de las grandes piedras permitía determinar los solsticios, o las salidas y puestas extremas en verano e invierno. En la fig. 2.8 se muestra una perspectiva de esta construcción semiderruida.



Figura 2.8. Observatorio de Stonehenge en Salisbury (sur de Inglaterra), construido aproximadamente en el 2000 a.C. (Fuente: Jellicos G, et al, 1995).

Como indica Yañez G. (1988) este tipo de construcciones reflejaba el alto grado de conocimiento astronómico del ser humano de aquella época.

Dado que la agricultura basaba todas sus actividades en las diferentes posiciones del Sol, dando lugar a las estaciones, no es de extrañar que el Sol fuese la figura central de las religiones primitivas, encontrándose multitud de referencias constructivas al Sol tanto en el antiguo Egipto, en Babilonia o en las culturas precolombinas.

Por ejemplo las Pirámides egipcias, tenían multitud de referencias solares y lunares, e incluso pronósticos astronómicos como el del templo de Ramses II cuya disposición fue estudiada para que el día 21 de octubre del año 1260 a.C. el primer destello a la salida del Sol iluminase las tres efigies del faraón situadas dentro del santuario. Demostrándose de nuevo el gran dominio del pronóstico solar.

2.2. Primeras ciudades

Las primeras ciudades en las que apareció una orientación consciente de las calles y edificios surge en la región de Mesopotamia entorno a la mitad del IV milenio antes de Cristo. Estas ciudades se construían en un recinto amurallado entorno a un palacio - templo configurándose a su alrededor.

dor un entramado de casas regulares, existiendo un entramado específico con ordenación de las viviendas que facilitaban el acceso a éstas.

A partir del III milenio a. C., en el delta del Nilo aparecen comunidades desarrolladas que tenían el objetivo de servir como mercados de regiones totalmente agrarias. La configuración de estas ciudades era igualmente ordenada.

En el valle del Indo la arqueología descubrió dos ciudades (Mohehjo Daro y Harappa) de unas 25 Ha y datadas entre el año 2500 al 1500 a.C. Éstas presentaban patrones de ordenamiento similares a sus predecesoras, a diferencia de ellas estaban dotadas de un avance técnico destacable como era un sistema de alcantarillado. En la figura 2.9 se muestra un plano de la ciudad de Mohenjo Daro.



Figura 2.9. Plano de ordenamiento de las calles en la ciudad de Mohenjo Daro (valle del Indo) datada entre el año 2500 y el 1500 a.C. (Fuente: Vinuesa J., 1991).

En el este de Asia aparecen las primeras ciudades en el valle del río Amarillo en el siglo XIV a.C. Al igual que las anteriores estaban configuradas por un recinto amurallado, con el palacio en el centro.

En el continente americano las primeras ciudades surgen en la península del Yucatán, en Guatemala y en México. En estas localizaciones las ciudades como tal no surgen hasta unos siglos antes de nuestra era.

2.3. Ciudades griegas

El filósofo griego Sócrates (469 – 399 a.C.) transmitía a sus discípulos el conocimiento de la adaptación del edificio al clima, teniendo en cuenta la diferente altura solar que alcanza el Sol a lo largo del año.

Su casa es un claro ejemplo de captación solar (figura 2.10). Ya conocía las posibilidades de aprovechar el efecto calorífico de los rayos solares en invierno y evitar éstos en verano. No sólo conocía el beneficio energético, sino que también creó espacios para tomar baños de Sol (solariums).

Se puede decir que la casa de Sócrates fue la primera concepción de casa pasiva que se conoce en la historia.

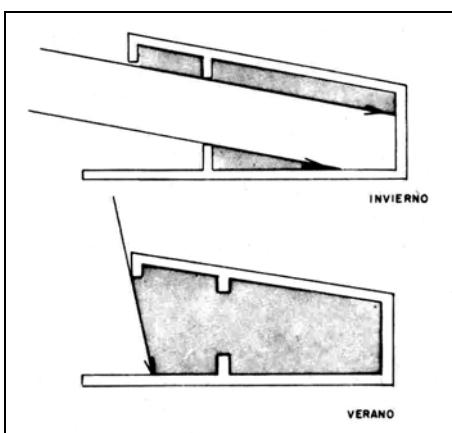


Figura 2.10. Casa de Sócrates diseñada teniendo en cuenta la orientación y el aprovechamiento solar. (Fuente: Yáñez G, 1988).

El modo de enseñar de Sócrates basado en la tradición oral y en la discusión como fuente de aprendizaje hizo que no se conserve más que referencias bibliográficas de sus discípulos. Entre ellos Jenofonte escribió la siguiente discusión de Sócrates con un interlocutor al que trataba de convencer de las ventajas del aprovechamiento solar:

“¿No es cierto que el que tenga la intención de hacerse con una casa como es debido lo que debe procurar es que sea lo más agradable de habitar y lo más útil”

Y una vez que esto se le concedía: “Agradable pues será tenerla que sea en verano fresca, y agradable que sea abrigada en el invierno.” Y ya que también en esto convenían: “Bien, pues en las casas que miran al mediodía el Sol en el invierno se cuela entre los soportales, más que en el verano, al pasar por la cima de nuestras cabezas y de los techos, proporciona sombra. Así que, si bueno es que así las cosas se presenten, habrá que construir más altas las partes que den al mediodía, para que el Sol invernizo no halle estorbos, y más bajas las que den el septentrión para que no den contra ella los vientos fríos.....”. (Fuente: Yáñez G, 1988)

Durante el periodo Helenístico, el desarrollo de las ideas favoreció el predominio de los enfoques racionalistas dentro de la filosofía. Teniendo una repercusión directa en el modo de configurar las ciudades. Hipodamos de Mileto (480 a.C.) formula la base teórica de organizar la ciudad basándose en una geometría de cuadrícula (Vinuesa J., 1991), que supone la incorporación de ideas organizadoras frente a la anterior forma de organización espontánea.

La estructura de cuadrícula existía ya desde las civilizaciones primitivas, pero hasta entonces había sido el resultado de una mínima organización, generalmente militar, cuando los accidentes topográficos lo permitían.

La estructura de forma ortogonal que propone Hipodamos distribuye los espacios libres y los edificios públicos ofreciendo soluciones para resolver dificultades topográficas mediante el uso de terrazas o de escaleras. Es en definitiva un modo racional de ordenación urbanística.

Este modelo de ciudad será más tarde utilizado por los romanos, los españoles en América y posteriormente en las ciudades norteamericanas.

La expansión de la ciudad griega es un proceso dilatado en el tiempo que contó con el beneficio del esplendor económico de la época. La aparición de nuevas ciudades con Alejandro Magno debido a la expansión militar y colonizadora, constata por primera vez la prueba de la relación entre dinámica económica y expansión urbanística (Vinuesa J., 1991), surgiendo nuevos y mayores desarrollos con la bonanza económica.

Ejemplos del diseño de ciudades con tramas regulares y con orientación favorable son las ciudades de Mileto (diseñada por Hipodamo), Priene, Olinto, etc.... En las figuras 2.11 y 2.12 se muestran dos entramados urbanos representativos de la época.

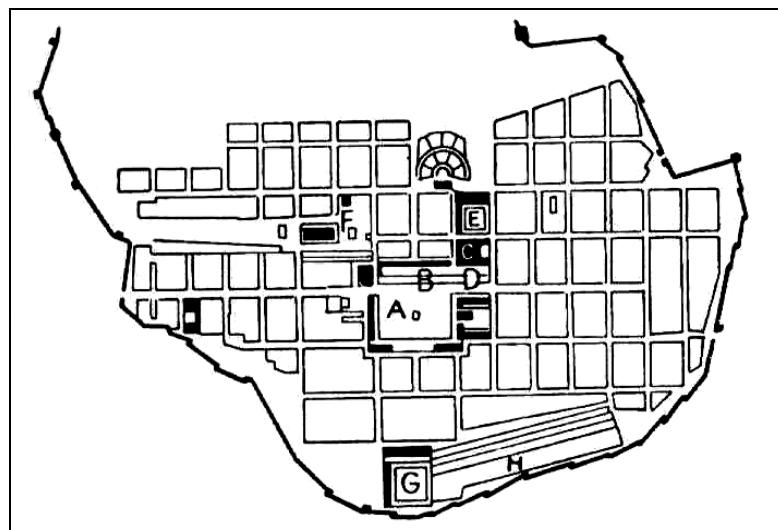


Figura 2.11. Ciudad de Priene (Asia Menor), con orientación de calles este-oeste y norte-sur. (Fuente: Koepf H., 1997).

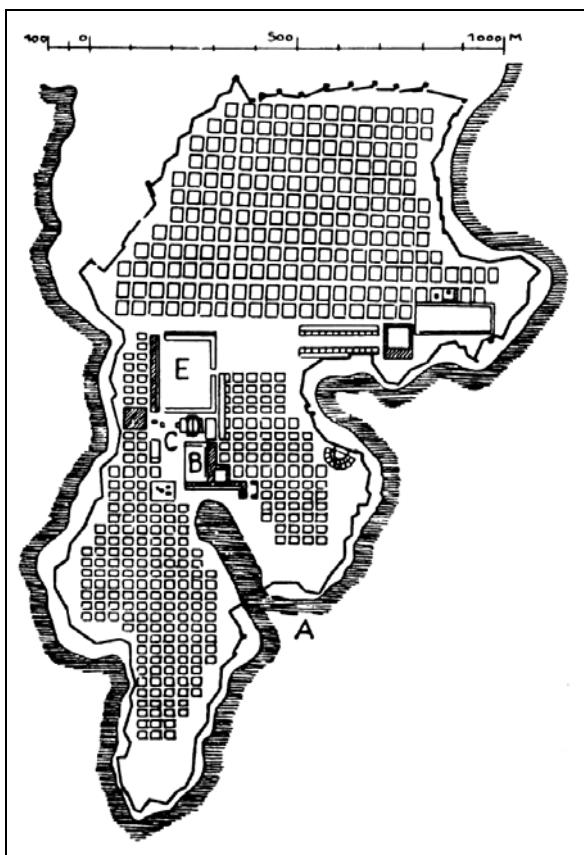


Figura 2.12. Ciudad de Mileto (Asia Menor), con orientación de calles este-oeste y norte-sur. (Fuente: Koepf H, 1997).

2.4. Ciudad romana

Los romanos desarrollaron el modelo de urbanismo propuesto por Hipodamo de Mileto en las ciudades griegas, respetando la trama regular y orientaciones favorables desde el punto de vista solar.

Las nuevas ciudades generadas o el desarrollo de las existentes en el proceso de expansión del Imperio desde el siglo III a.C. se basaban en dos ejes perpendiculares. El que poseía dirección norte - sur se llamaba cardo (de seis metros de ancho) y decumano (de doble anchura) el de dirección este - oeste.

El punto de intersección de ambas calles era para algunos autores el símbolo de orden militar y del poder del Imperio y en él se localizaban el pretorio, el foro y los templos.

En las figuras 2.13 a 2.15 se muestran varios ejemplos de ciudades romanas. La primera de ellas es la ciudad de Timgad en la que se ve claramente el trazado de calles perpendicular al uso romano, en la segunda se pueden observar diferentes cascos urbanos y en la última se muestra una reconstrucción aérea en la que se han trazado las vías romanas en la ciudad de Zaragoza (Caesaraugusta).

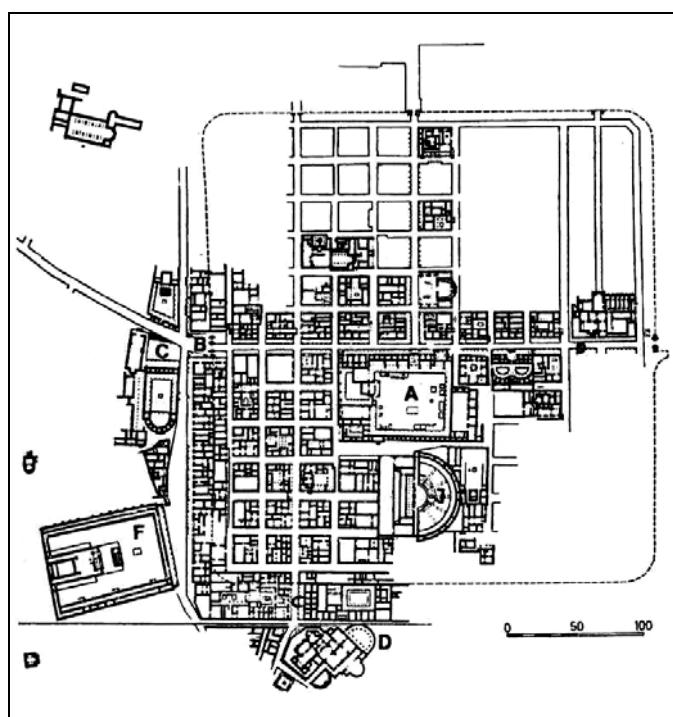


Figura 2.13. Ciudad de Timgad con trazado de calles según modelo romano. (Fuente: Koepf H., 1997).

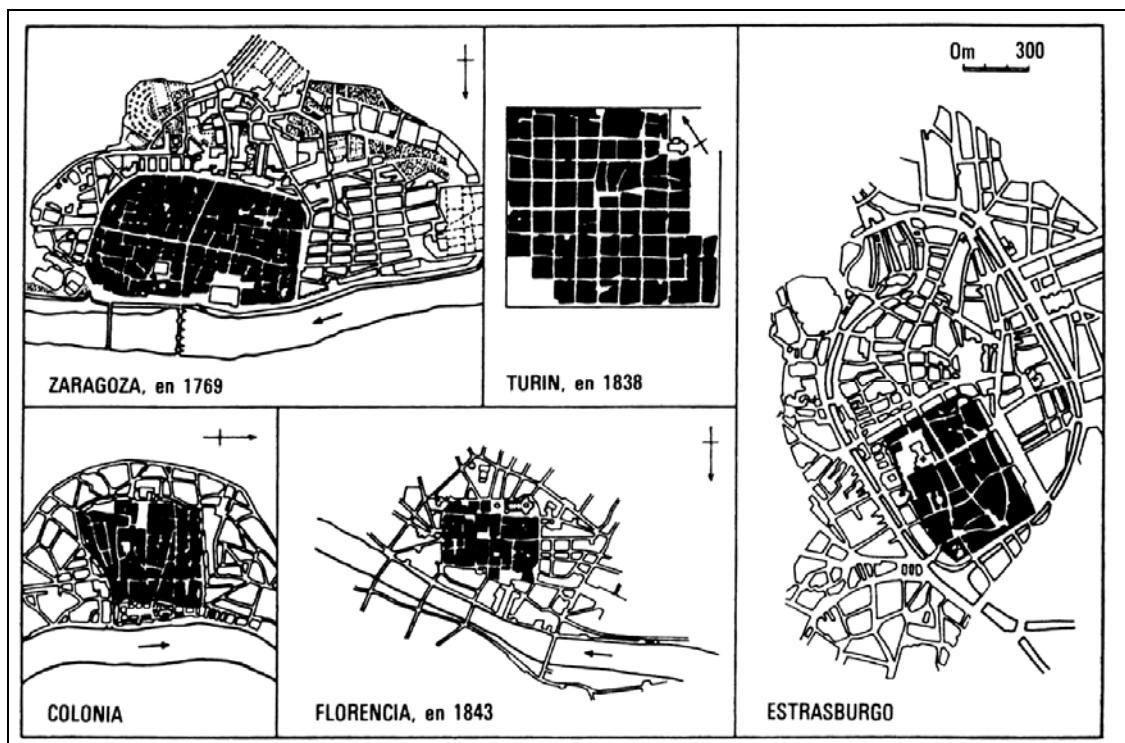


Figura 2.14. Ciudades típicas con trazado inicial romano. (Fuente: Zárate A., 1991).



Figura 2.15. Imagen aérea de Zaragoza con trazado de calles de la antigua Caesaraugusta se verifica como perdura todavía esta configuración. (Fuente: Vinuesa J., 1991).

El romano Vitruvio en el año 25 a.C. en su famoso libro ‘Los diez libros de Arquitectura’ mostraba su preocupación por la relación entre el clima y la arquitectura. El libro VI. Capítulo I. Yañez G. (1988) recoge el siguiente extracto:

“Los edificios particulares estarán bien dispuestos si desde el principio se ha tenido en cuenta la orientación y el clima en que se van a construir; porque está fuera de dicha que habrán de ser diferentes las edificaciones que se hagan en Egipto que las que se efectúen en España y distintas las que se hagan en Ponto de las que se efectúen en Roma; ya que estas diferencias dependen siempre de la de los países, puesto que una parte de la tierra está bajo la influencia inmediata de su proximidad al Sol, otra por su distancia a él, y otra por su posición intermedia entre ambas, resulta templada. Por tanto, puesto que la posición del cielo con respecto a la tierra, por la inclinación del Zodiaco y por el curso del Sol, está naturalmente dotada de diversas cualidades, por eso, obedeciendo a la misma ley, conviene atender en la construcción de los edificios a las diversidades de países y a la diferencia de climas.”

En los países septentrionales, se han de hacer las habitaciones abovedadas, lo más abrigadas posibles, no abiertas, sino orientadas a los puntos cálidos del cielo. En las regiones meridionales, al contrario, por estar expuestas al ardor del Sol, como ya de por sí los edificios padecen los efectos del calor, se deben hacer con grandes huecos y con la orientación a la tramontana o al aquilón. De esta manera, el arte y la ciencia remediarán las molestias que por sí mismas produce la Naturaleza... igualmente para los demás países se buscará la compensación según la inclinación que tiene en el cielo del eje del mundo."

Con la ciudad romana se termina un ciclo en el que ésta se generaba con un orden geométrico teniendo en cuenta la orientación solar. Verificándose la preocupación en la arquitectura por el soleamiento y por el clima.

2.5. Ciudad musulmana y medieval

El Mediterráneo según Vinuesa J. (1991) durante siglos fue el vehículo de propagación de la urbanización y por tanto un elemento de vinculación cultural, pero con la expansión del Islam a partir del siglo VII va a convertirse en una barrera entre dos mundos hostiles y antagónicos. Al hablar de la ciudad medieval el autor argumenta que es necesario referirse a esos dos contextos diferentes

La ciudad musulmana presenta una constitución muy poco cambiante a lo largo del tiempo, siendo ésta poco diferenciada, sin apenas otros espacios libres que las calles intrincadas, cortas y estrechas.

En las ciudades existen calles radiales que terminan en las murallas, incluso los diferentes arrabales que podían existir poseían sus propias murallas.

En cuanto a los edificios no presentan prácticamente huecos a las calles, recogiéndose las viviendas en patios interiores, siendo la calle un mero acceso al edificio.

Europa sufre un proceso de continentalización durante la Edad Media volviendo a estructuras rurales con mercados muy locales. Las nuevas ciudades surgen de aldeas y cuentan con pocos habitantes.

Estas ciudades medievales principalmente por motivos de defensa no presentan un ordenamiento en trama ortogonal, generándose tramas radioconcentradas debido a su restricción de confinamiento impuesto por sus murallas.

En la figura 2.16 se muestra un caso tipo de ciudad medieval en la que ya no existe la disposición adecuada que facilite el aprovechamiento solar.

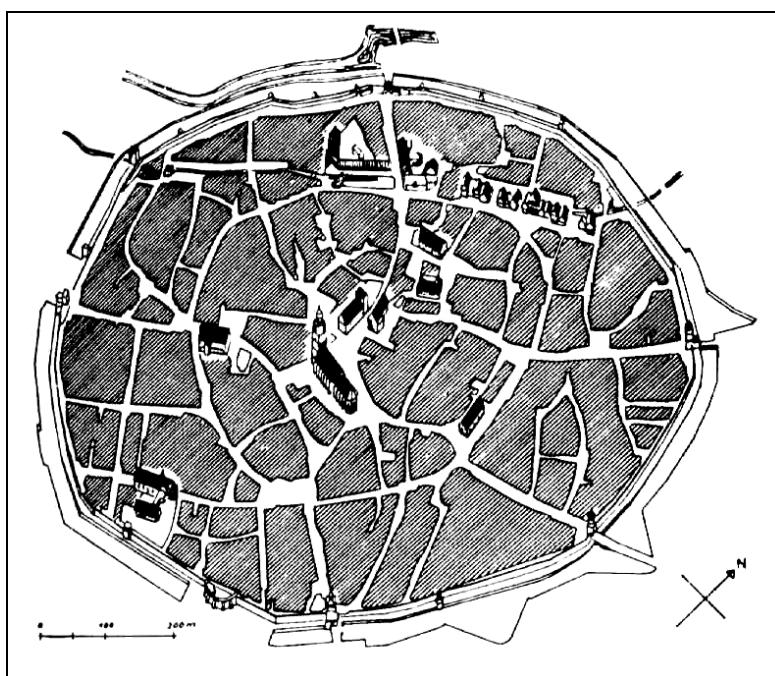


Figura 2.16. Ciudad medieval de Nördlingen, el primer centro se generó en el siglo XIII, ampliándose en el siglo siguiente con un anillo concéntrico exterior. (Fuente: Koepf H., 1997).

2.6. La ciudad barroca

Los historiadores hablan del urbanismo en el Renacimiento y de la ciudad Barroca. No se habla de la ciudad del Renacimiento ya que no se introdujeron cambios que permitieran establecer una tipología específica.

El Renacimiento fue un movimiento intelectual según Vinuesa J. (1991), encontrando aportaciones teóricas y unas escasas actuaciones de reforma interior. Entre las aportaciones teóricas destacan las de Alberti con su obra ‘Diez libros de Arquitectura’ y Palladio con sus ‘Cuatro libros de arquitectura’. En estas obras muestra su sensibilidad dentro de la tradición vitruviana hacia los aspectos climáticos en relación con la ciudad.

En América en esta época aparecen Las Leyes de Indias de las que Chueca F. (1974), dice que son la primera legislación urbanística conocida en el mundo, imponiendo un modelo en cuadrícula.

En la ciudad barroca se aumenta el valor estético utilizando jardines como elementos decorativos, a la vez que se mejoran los medios de transporte, aparece el carro de caballos con llanta y radio que harán que las calles se tracen anchas y rectas

Los cambios sociales hacen aumentar el tamaño de las poblaciones y los recorridos de transporte al separarse el lugar de trabajo del domicilio propio.

En la figura 2.17 se muestra el ejemplo de la ciudad barroca de Karlsruhe.

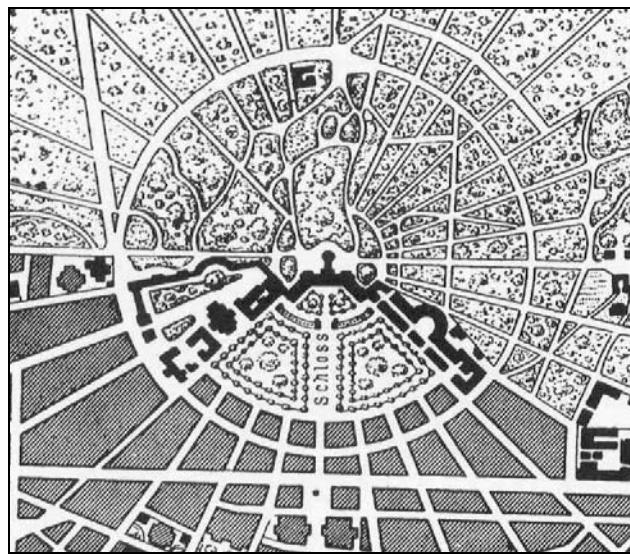


Figura 2.17. Ciudad barroca de Karlsruhe, en la zona superior se localizan los jardines.
(Fuente: Koepf H., 1997).

2.7. Urbanismo en el siglo XIX y XX

A partir del siglo XIX, aparece en la ciudad los conflictos entre los diferentes agentes sociales. Cada uno de ellos tiene intereses diferentes, además surge un fuerte crecimiento de la población en las ciudades. Ante estas circunstancias el Estado y las élites dirigentes se ven obligados a introducir criterios de racionalidad a través de la planificación urbana como modo de control de la situación social.

De otro modo la urbanización espontánea multiplicaría los desequilibrios funcionales provocando daños e inconvenientes económicos y políticos capaces de anular la acumulación de beneficios. Pudiendo propiciar un malestar social susceptible de estallar en formas violentas de lucha urbana como manifestación del enfrentamiento de clases.

La planificación según Zárate A. (1991) se impone por la necesidad de evitar los daños e inconvenientes de la urbanización espontánea y para asegurar la continuidad en la acumulación de beneficios. Los planes urbanísticos configuran las operaciones que intervienen en la producción del espacio: apropiación del suelo, urbanización, edificación, construcción, creación de infraestructuras; estableciendo el orden espacial de los usos del suelo y el orden temporal en la construcción de la ciudad para asegurar cierto nivel de seguridad y rentabilidad de los recursos.

Todo ello es favorecido por la búsqueda de criterios de bienestar y la conveniencia de una dirección centralizada de la gestión administrativa y fiscal en las grandes aglomeraciones con vistas a la corrección de desequilibrios espaciales.

En el siglo XIX se intensifica la utilización del vidrio utilizado conjuntamente con el hierro colado, generándose edificios acristalados a modo de grandes invernaderos. Este uso combinado permitió crear naves de grandes luces dando lugar a nuevos programas como fueron las estaciones de ferrocarriles, las salas de exposiciones o los mercados.

Ejemplos de este tipo de arquitectura son el Cristal Palace de Londres (1851) o la Galería de las Máquinas en París (1889). En las figuras 2.18 y 2.19 se muestran unas imágenes del Cristal Palace donde puede observarse la cubierta totalmente acristalada del edificio.



Figura 2.18. Cristal Palace (Paxton J, Londres –1851) vista exterior. (Fuente: Gympel J., 1996).



Figura 2.19. Cristal Palace (Paxton J, Londres –1851) vista interior. (Fuente: Gympel J., 1996).

Desde 1920 a 1940 se llevan a cabo estudios importantes relativos al soleamiento. En Francia, Rey y Pidaux realizan análisis para determinar la radiación solar que alcanza diferentes superficies verticales para distintas orientaciones, también analizaron la influencia de la separación entre edificios para asegurar la captación solar y establecieron el concepto de diagrama heliotérmico basado en la combinación de la radiación recibida y la temperatura exterior en función de la orientación de las fachadas.

En esta época se llevan a cabo también la creación de cartas solares para determinar la posición del Sol, estudios de soleamiento de edificios y de iluminación natural.

Entre los trabajos más destacados se sitúa el de Gropius W. (maestro de la Bauhaus), analizando cuál es la configuración más apropiada de edificios lineales teniendo en cuenta la ausencia de sombreado.

Se plantea como objetivo verificar si es mejor construir edificios de poca altura o bloques de grandes alturas. Para ello se plantea estudiar cual es la ocupación en planta de un mismo número de viviendas para diferentes alturas de edificios. La conclusión que obtiene es que era mejor construir edificios más altos porque ocupaban menos espacio de terreno. En la figura 2.20 se muestra alguno de los esquemas que realizó.

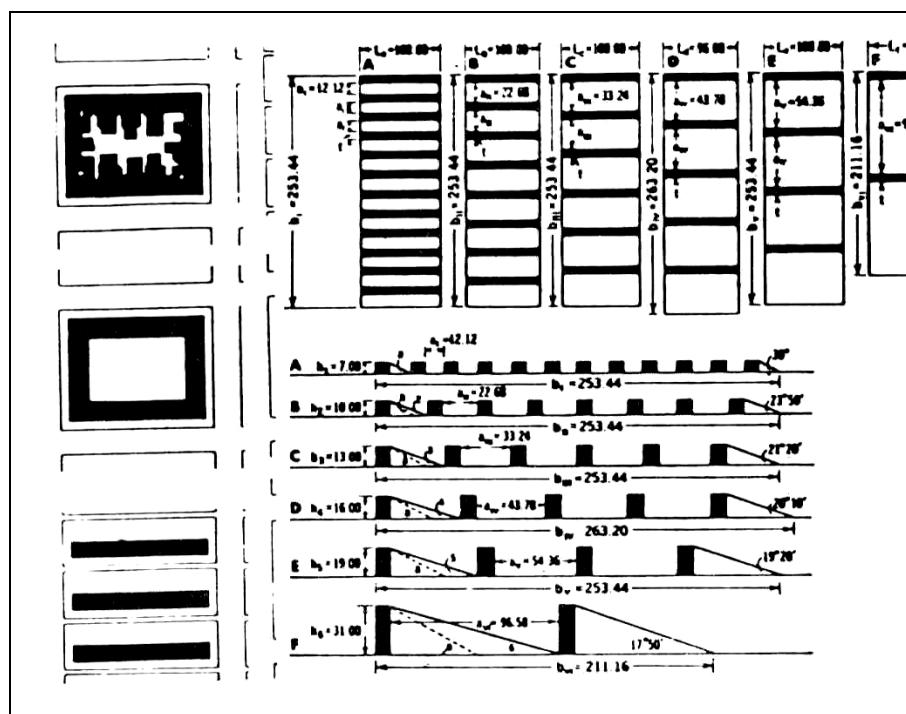


Figura 2.20. Trabajos de Gropius W. para verificar la ventaja de la construcción en altura en relación a la ocupación del suelo. (Fuente: Yáñez G., 1988).

Los estudios de Gropius fueron cuestionados posteriormente, ya que si hubiera tenido en cuenta el soleamiento desde el antepecho de las ventanas de las primeras plantas se reduciría sustancialmente la ocupación para los edificios de plantas bajas.

Estos análisis de los edificios lineales van a cambiar la forma de realizar urbanismo, eliminándose el edificio en manzana decimonónica, teniendo eco en otros países europeos.

En Alemania se produce a fines de los 20 uno de los primeros errores sobre la captación solar, orientando mal un amplio programa de edificios para la clase trabajadora con viviendas orientadas a dos fachadas opuestas (este y oeste). Este error se produjo porque se creyó que era más conveniente tener soleamiento en ambas fachadas. Sin embargo los resultados fueron totalmente negativos desde el punto de vista energético en invierno, produciéndose además sobrecalentamientos en verano.

En la figura 2.21 se muestra esta distribución de edificios lineal con mala orientación.

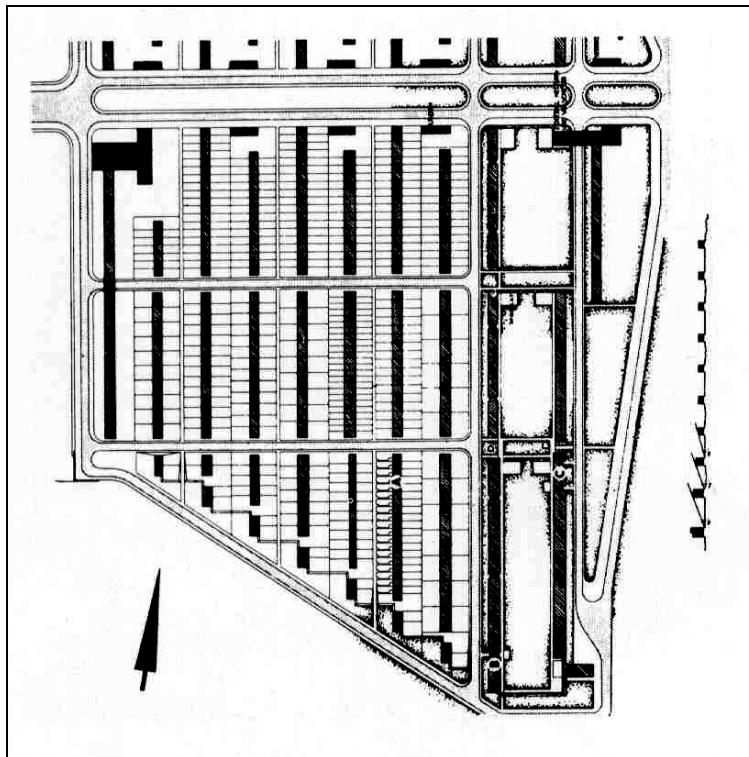


Figura 2.21. Urbanización construida en Karlsruhe (1929) con edificios lineales con fachadas mal orientadas (este-oeste). (Fuente: Yañez G., 1988).

Otros de los precursores del aprovechamiento solar fue Meyer H., continuando con la labor de Gropius W en la Bauhaus.

Desde 1930 hasta 1960 surgieron diferentes arquitectos que diseñaron edificios potenciando el aprovechamiento solar, entre estos destacan por la importancia de sus aportaciones:

- Klein A. (USA)
- Terragni G. (Italia)
- Alvar Aalto (en Finlandia)
- Ginzburg M. (URSS)
- Atkinson (USA)
- Kech (USA), utiliza por primera vez un vidrio doble con cámara de aire en los años treinta
- Brown A. (USA)
- Atkinson (USA)
- Hermanos Olgay (USA), establecen el método bioclimático para adaptar el edificio al clima teniendo en cuenta la forma del edificio, la orientación y un diagnóstico climático basado en la zona de confort

- Givoni G. (Israel), extiende los estudios de los hermanos Olgay a climas cálidos y secos
- Trombe (Francia), creador del muro trombe
- Morgan E. (Inglaterra), inventor del muro solar másico
- Hay y Yellot (USA), aplican el aislamiento móvil en cubiertas
- Baer H. (USA), aplica el muro captador con acumulación de agua.

Los anteriores fueron los pioneros de la arquitectura bioclimática en tiempos modernos. Crearon nuevos sistemas y analizaron el comportamiento de los edificios así como el aprovechamiento energético obtenido.

En la imagen siguiente se muestra un ejemplo de estos edificios, en concreto es una casa con gran muro Trombe en la fachada sur. Construida por Trombe como edificio de servicio para el horno solar de Odeillo supone la primera demostración del funcionamiento del muro Trombe.



Figura 2.22. Casa con muro trombe, construida en los Pirineos Orientales. (Fuente: Yañez G., 1988).

En este apartado hay que hacer una referencia especial a la obra de los tres grandes arquitectos del siglo XX:

- Mies van de Rohe
- Frank Lloyd Wright
- Le Corbusier

La obra arquitectónica de Mies van de Rohe se caracterizó por la universalidad, característica contraria al postulado del aprovechamiento solar y de adaptación del edificio con el clima del lugar.

En sus edificios utilizaba profusamente el vidrio en todas las fachadas, lo que provocaba grandes consumos de calefacción y refrigeración para mantener las condiciones de confort interior.

Un ejemplo de su arquitectura es la casa unifamiliar de Farnsworth (Fox River, 1945), sometida en invierno a un clima muy frío y a veranos cálidos y húmedos. En ésta según Yañez G. (1988) se producían grandes sobrecalentamientos en verano, (las ventanas no eran practicables), mientras que en invierno existían sobre enfriamientos. En algún momento la propietaria de la vivienda llegó a decir que era inhabitable ‘esa caja de cristal’.

La obra de Frank Lloyd Wright es completamente opuesta a la de Mies van de Rohe, Wright se preocupó por integrar sus edificios con el entorno y con el clima. En sus edificios utilizaba conceptos tales como el aprovechamiento solar, aislamiento diferenciado, inercia del edificio, sombreado y colores adaptados para climas cálidos.

Era un gran conocedor de la potencialidad de la arquitectura climática e incluso intentaba no utilizar sistemas de climatización si podía proteger el edificio de la captación solar, porque pensaba que no era natural generar climas artificiales.

Un ejemplo de la arquitectura adaptada al clima de Wright es la casa Jacob II (Wisconsin, 1949). En la fachada sur diseñó un gran acristalamiento con un alero de protección para el verano, mientras que la fachada norte estaba semienterrada. Para aumentar la inercia utilizó muros macizos de alta inercia. En la figura 2.23 se muestra la casa Jacobs II.

La obra de Wright muestra el gran dominio e intuición respecto a la arquitectura bioclimática.

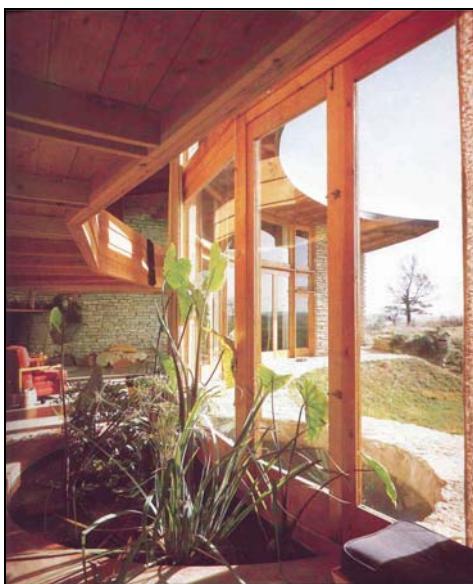


Figura 2.23. Vista acristalamiento sur desde el interior de la vivienda Jacobs II construida en Wisconsin en 1949,. (Fuente: Pearson D., 2000).

El tercer gran arquitecto del siglo XX fue Le Corbusier, su obra se sitúa entre la de van de Rohe y la de Wright. En una primera época su arquitectura es del estilo de la de van de Rohe, pasando posteriormente a plantearse el diseño teniendo en cuenta el aprovechamiento solar, llegando a considerar el Sol como una de las claves de la arquitectura y del urbanismo.

En la carta de Atenas de 1933, Le Corbusier plasma su preocupación por el aprovechamiento solar con las siguientes frases: ‘El Sol, la vegetación y el espacio son las tres materias primas del urbanismo’. ‘Introducir el Sol es el nuevo y más imperioso deber del arquitecto’.

En algunas de sus obras mantuvo una contradicción en su línea de trabajo, un ejemplo fue el edificio de ‘La Cite de Refuge’ (1933). En éste diseñó una gran superficie acristalada al sur que provocó que las condiciones térmicas en verano fueran insostenibles, teniendo que poner un ‘brise-soleil’ para producir sombreado y eliminar las condiciones de desconfort en verano.

En las figuras 2.24 y 2.25 se muestra una imagen del edificio inicial y cómo quedó después de la modificación. El ‘brise-soleil’ lo utilizó en sus obras como elemento de diseño para el control solar, repitiendo éste en bastantes edificios.



Figura 2.24. Fachada sur inicial del edificio de Le Corbusier ‘La Cite de Refuge’ (1933).
(Fuente: Yañez G., 1988).

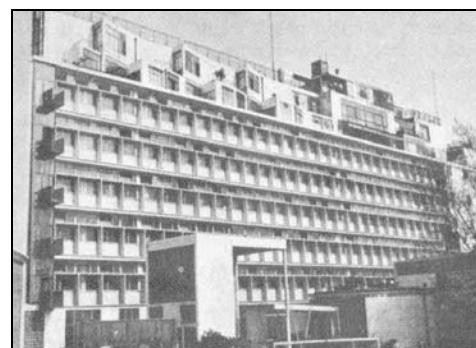


Figura 2.25. Fachada sur modificada del edificio de Le Corbusier ‘La Cite de Refuge’ (1933). (Fuente: Yañez G., 1988).

En este repaso por el siglo XX ha quedado manifiesta la separación que ha existido entre la arquitectura y la adaptación al clima de los edificios. Una minoría de las actuaciones realizadas se basó en los principios de la arquitectura bioclimática.

Para tener en cuenta cómo va a ser el nuevo futuro hay que hacer una reflexión sobre el crecimiento de las áreas urbanas. Ruano M. (1999) indica que actualmente el 50% de la población mundial vive en zonas urbanas, en comparación con un 10% a principios de siglo XX, siendo previsible que en el 2025 la población urbana alcance un 75%.

En la figura 2.26 se muestra la tendencia del crecimiento de la población urbana. Éste no es igual y depende del grado de desarrollo del país, en los más avanzados el crecimiento ha sido muy fuerte llegando a estabilizarse para porcentajes entre el 70 y el 90%, mientras que en los menos desarrollados el crecimiento continúa a fuerte ritmo.

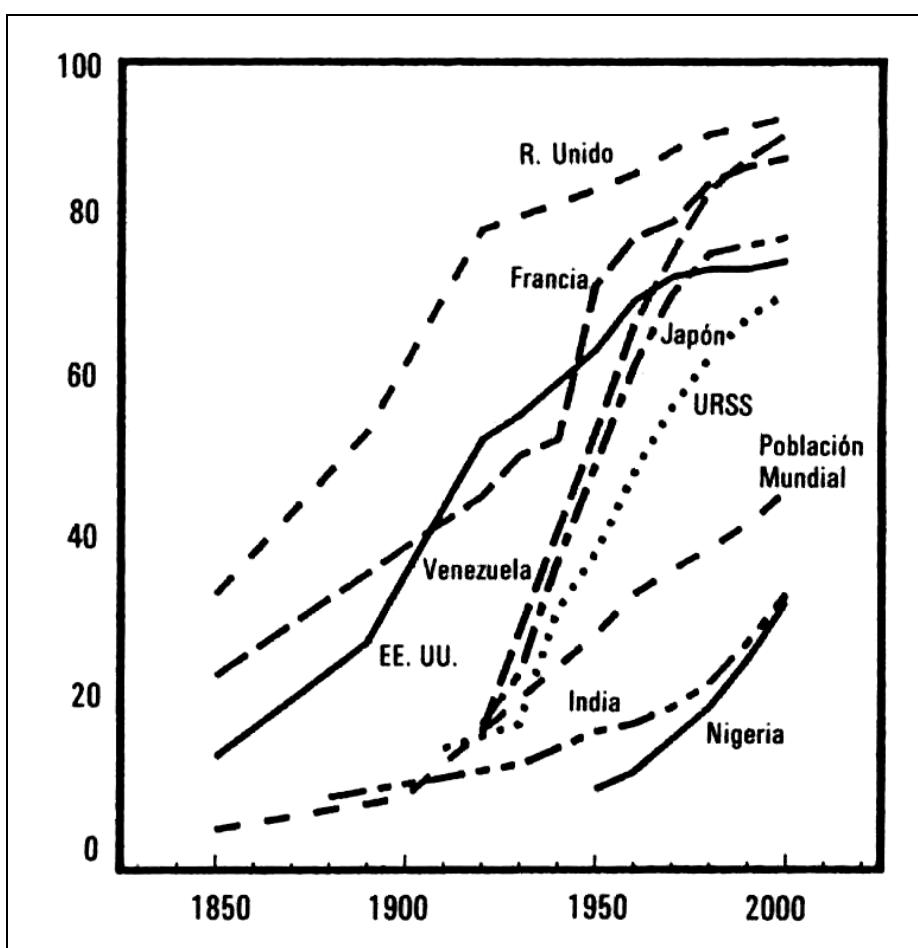


Figura 2.26. Porcentaje de población en zonas urbanas para diversos países. (Fuente: Vinuesa J., 1991).

Las ciudades contribuyen a día de hoy a un 75% de la contaminación global y utilizan un 70% de la energía consumida (Ruano M., 1999). En 1990 existían 35 poblaciones con más de 5 millones de habitantes de las cuales 22 pertenecían a países en vías de desarrollo.

Según Ruano M. (1999) el problema del crecimiento acelerado de la población en países en vías de desarrollo implica que un elevado número de ciudadanos no contarán con servicios básicos como electricidad, agua o alcantarillado, y dará lugar a zonas muy conflictivas, insalubres e inmanejables.

Ante el problema del crecimiento de las ciudades en las últimas décadas ha surgido con empuje una tendencia que aúna la tecnología y la ecología. Las iniciativas han permitido construir nuevas ampliaciones de las ciudades que tuvieran en cuenta la sostenibilidad, diseñadas pensando en el transporte, el aprovechamiento solar y con grandes lugares verdes de encuentro donde los ciudadanos compartan sus ratos de esparcimiento.

En el libro de Ruano M. (1999) se recogen 60 proyectos de urbanismo y arquitectura bioclimática ejecutados o en fase de proyecto de las últimas décadas del siglo XX. Entre estos proyectos se muestran a continuación los más importantes desde el punto de vista del aprovechamiento solar.

En 1962 Rainer R. diseñó una urbanización de 990 viviendas en Linz (Austria) en la que se orientaron las viviendas al sur. Los edificios eran de baja altura contando con innumerables zonas verdes con estanques que aprovechan el agua de lluvia. En la figura 2.27 se muestra una imagen de esta urbanización.



Figura 2.27. Ciudad Jardín de Puchenau en Linz (Austria, 1962). (Fuente: Ruano M., 1999).

En el interior del casco urbano de Sant Feliu de Llobregat (Barcelona) se construyó una urbanización peatonal con 168 viviendas (unifamiliares y bloques), el proyecto urbano lo realizó Roa M. (1992).

La pequeña urbanización está configurada por una trama de 4 por 3 calles peatonales con plazas públicas en sus intersecciones que permite la convivencia del vecindario. En la figura 2.28 se incluye una imagen en planta de la urbanización apreciándose el alineamiento de los edificios y la configuración de zonas verdes peatonales interiores.

Las olimpiadas o las exposiciones mundiales son eventos que permiten realizar actuaciones urbanísticas o reformas con criterios medio ambientales de gran repercusión por la gran cantidad de personas de todos los países que se movilizan.

La Villa Olímpica de Sidney (2000) es un ejemplo de actuación consciente con el medio ambiente. El concurso para desarrollar la Villa lo ganó Greenpeace pero decidió que participaran con él los cuatro finalistas de este modo el grupo de cinco llevó a cabo el diseño con el apoyo interdisciplinar de todos.

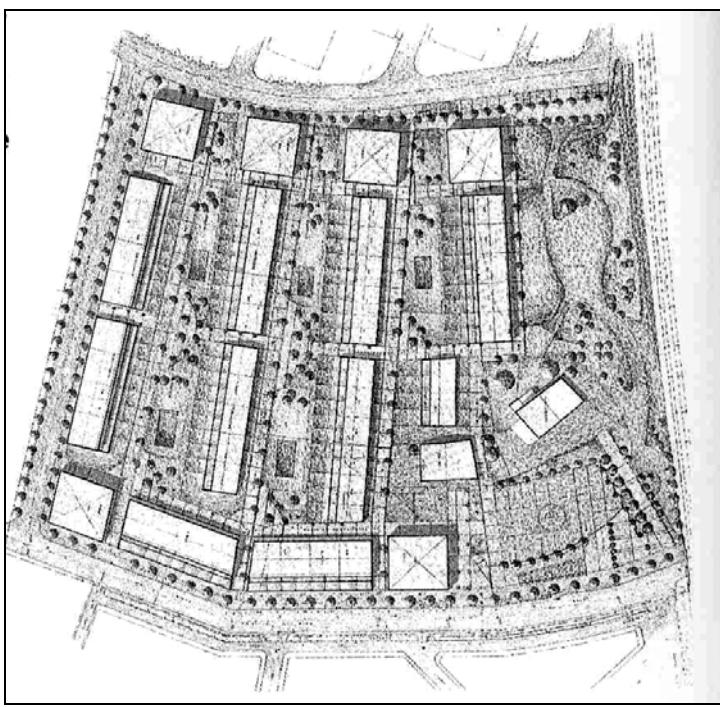


Figura 2.28. Can Llovera es un nuevo barrio de 4.5 Ha de Sant Feliu de Llobregat (Barcelona, 1992) cuenta con 168 viviendas diseñado para favorecer el desplazamiento a pie. (Fuente: Ruano M., 1999).

En la Villa se llevaron actuaciones para el ahorro energético con aprovechamiento pasivo en la viviendas, tratamiento de deshechos, utilización de materiales respetuosos con el medio ambiente, uso de sistemas innovadores de conservación del agua, integración con otros proyectos de la región y utilización de sistemas de transporte de bajo impacto ambiental.

En la figura 2.29 se incluye en planta el diseño de la Villa Olímpica con la distribución de edificios con orientación preferente sur en casi la totalidad de edificios.

Al igual que en Sant Feliu de Llobregat, en Guntramsdorf (Austria, 1992) se ha diseñado un pequeño barrio de 140 viviendas en el que se han utilizado zonas peatonales y como característica destacada figura el diseño de sus viviendas.

En los edificios se utilizó materiales respetuosos con el medio ambiente que dotaban al edificio de alta inercia (aislamiento exterior), las viviendas contaban con invernaderos y con colectores solares térmicos. El agua de lluvia se recoge para utilizarla en las cisternas de los inodoros, las lavadoras y el riego de jardines.

También se ha utilizado un sistema de separación de residuos domésticos y de conversión de éstos en abono. La orientación de las viviendas es sur como se puede comprobar en la figura 2.30.

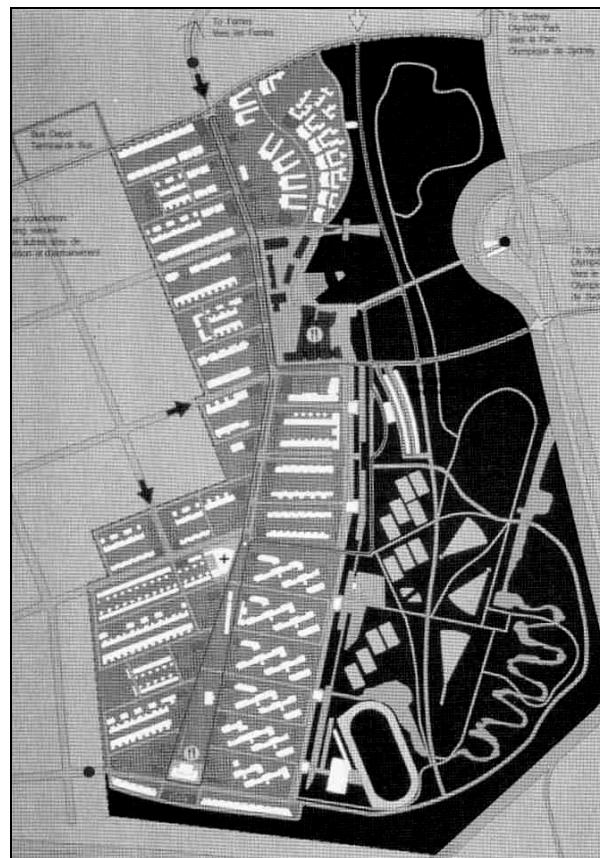


Figura 2.29. Villa Olímpica de Sidney (2000). Está dotada de medidas para reducir el impacto ambiental. (Fuente: Ruano M., 1999).

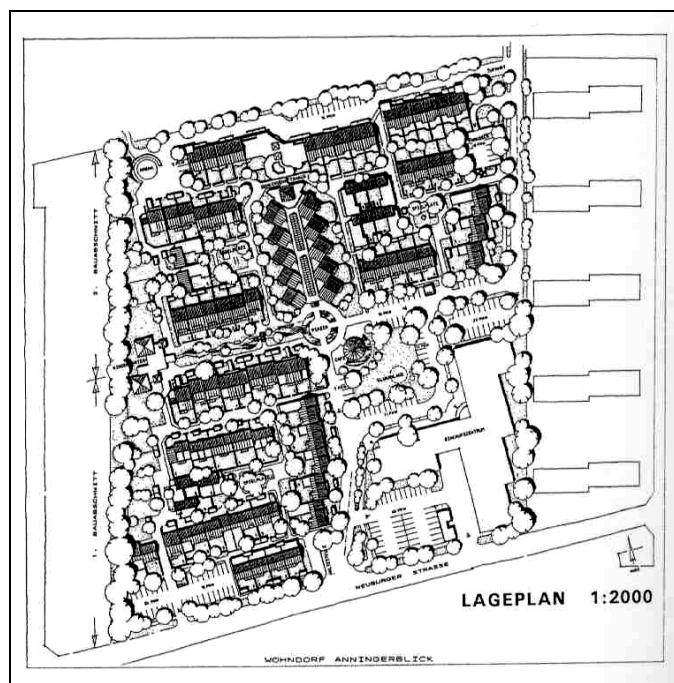


Figura 2.30. Ecopueblo Anningerblick en Guntramsdorf (Austria 1992). (Fuente: Ruano M., 1999).

En Tenerife el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) puso en marcha en (1995) un concurso de Arquitectura Bioclimática para desarrollar 25 viviendas adaptadas a un microclima particular con altas velocidades de viento.

No fue una actuación urbanística, pero se ha destacado por la preocupación por el medio ambiente demostrada, utilizándose incluso una planta de desalación accionada con energía renovable y la depuración de las aguas residuales para el riego.

Un esquema en planta de la zona con las 25 viviendas se muestra en la figura 2.31.

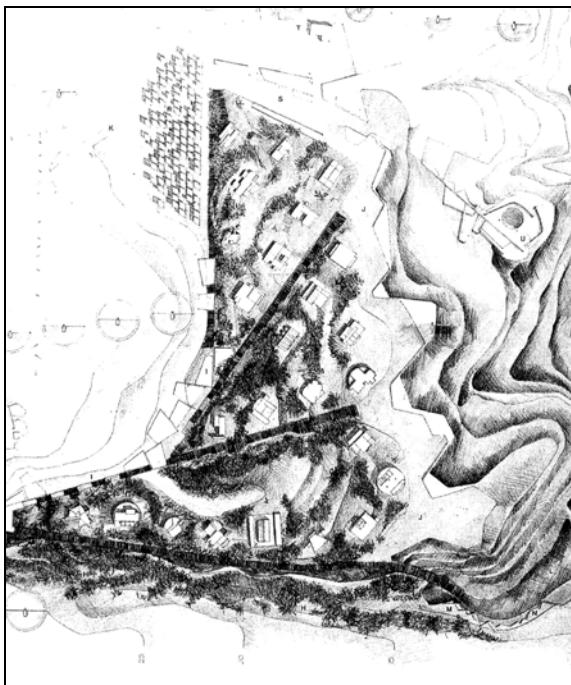


Figura 2.31. Urbanización bioclimática promovida por el ITER en Tenerife (1995).
(Fuente: Ruano M., 1999).

En Atenas (Grecia, 1978-1989) se realizó una planificación urbana para llevar a cabo una urbanización de 435 viviendas en 7.2 Ha. En los edificios como experimentación se ejecutaron 17 tipos diferentes de sistemas activos solares con sistemas tradicionales de calefacción, el resultado obtenido fue que las viviendas consumían un 80% menos que las viviendas tipo de esa zona.

Las viviendas están orientadas al sur en una zona de talud natural que posibilita la reducción de sombreado, en los edificios se hizo especial énfasis en el aislamiento y la utilización de invernaderos así como el uso de colectores solares térmicos. En la figura 2.32 se muestra una imagen de esta urbanización.



Figura 2.32. Pueblo solar en Atenas (Grecia, 1978-1989). (Fuente: Ruano M., 1999).

En Inglaterra se ha desarrollado el proyecto BedZed (Beddington Zero Energy Development), con el que se perseguía construir 100 viviendas de bajo consumo energético aplicando criterios de eco-construcción, el resultado obtenido arroja que el consumo de calefacción de estas viviendas es un 90% inferior respecto al que se obtiene en viviendas inglesas de similar compacidad.

El desarrollo de BedZed (Wallington) plantea un ordenamiento de las viviendas al sur e incluye grandes espacios acristalados hacia esta orientación, utilizándose como elementos activos tanto captadores térmicos como fotovoltaicos. Las viviendas y oficinas se vendieron a personas que estaban interesadas en este nuevo concepto de vida. En la figura 2.33 se incluye una vista aérea de BedZed.



Figura 2.33 Imagen aérea de BedZed en Wallington (sur de Londres). (Fuente: Hill Dunter Architects).

En España las grandes actuaciones urbanísticas a día de hoy que se están desarrollando basándose en los conceptos de la arquitectura bioclimática y del urbanismo energético son: Residencial Parque Goya (3.500 VPO), Valdespartera (9.600 VPO) y Sarriguren (5.000 VPT). Las dos primeras están ubicadas en Zaragoza y la tercera en Navarra.

La urbanización Residencial Parque Goya ha sido la primera área urbana desarrollada con un Plan Parcial que obligaba a los arquitectos concursantes en cada una de las distintas parcelas a diseñar los edificios con criterios bioclimáticos, aplicando criterios similares la urbanización de Valdespartera (2002) y la de Sarriguren (2002).

En las siguientes figuras se incluyen algunos esquemas de estas grandes urbanizaciones.



Figura 2.34 Simulación de vista sur de Residencial Parque Goya en Zaragoza. (Fuente: GEE de la Universidad de Zaragoza).



Figura 2.35 Distribución de edificios en la urbanización de Valdespartera en Zaragoza.
(Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza).

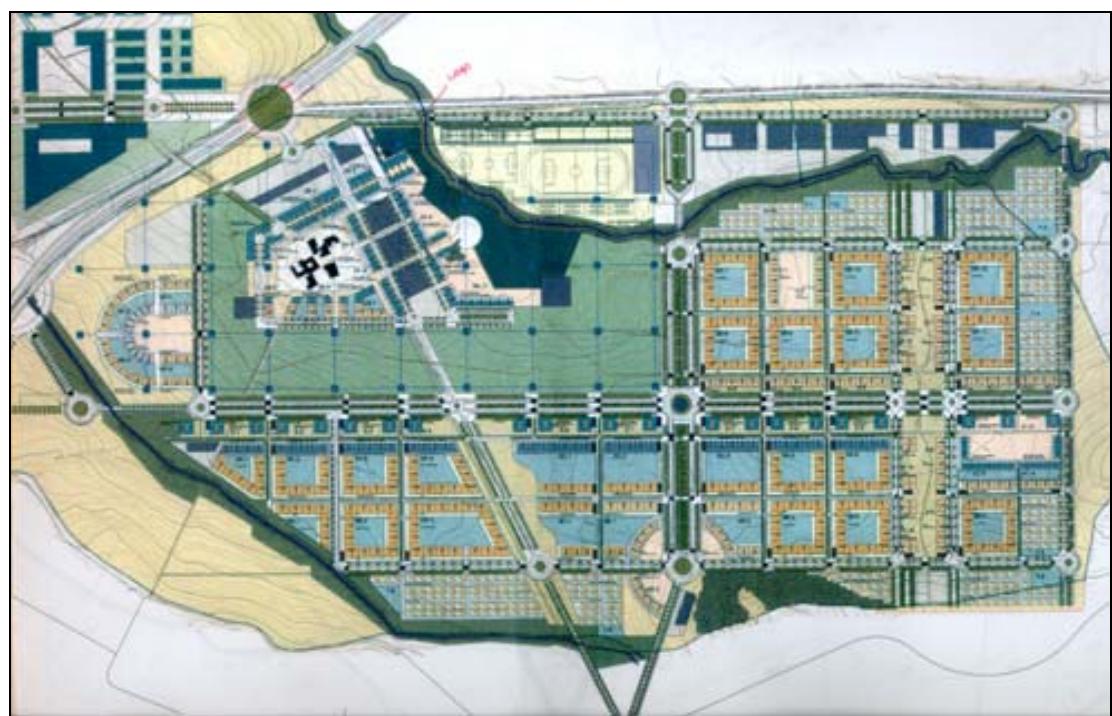


Figura 2.36 Distribución de edificios en Sarriguren (Navarra). (Fuente: Taller de Ideas).

Estas últimas actuaciones plantean un futuro esperanzador en los nuevos desarrollos urbanísticos, en los que se tendrá en cuenta la orientación de las calles y las limitaciones de sombras en función del clima en el que se ubiquen los edificios.

Del breve recorrido histórico se desprende que el paradigma urbanístico ha ido perdiendo en las últimas centurias, salvo contadas excepciones, los elementos que condicionaban la planificación en función de las necesidades energéticas. Otros elementos como el transporte o la estética del diseño geométrico han sido factores dominantes. Sin embargo, las necesidades actuales derivadas de la inconveniente dependencia estratégica de los combustibles fósiles y, más exigente todavía, el indeseable impacto ambiental de los consumos energéticos, obliga a introducir el consumo energético como factor determinante del diseño.

En este contexto el objetivo de la tesis es facilitar un método de cálculo que pueda definir objetivamente los parámetros urbanísticos, (en estas grandes actuaciones o en pequeñas promociones), para reducir el consumo energético de calefacción y refrigeración, así como las medidas complementarias a nivel de edificio que deberían realizarse (nivel aislamiento, existencia sombreadamiento, etc..).

En los apartados siguientes se realiza una exposición de los parámetros controlables en urbanismo que pueden permitir el aprovechamiento o la protección solar y por ende permitir reducir el consumo energético de los edificios.

2.8. Parámetros urbanísticos y consumo energético

El urbanismo, previamente limitado a definir la ciudad como un conjunto, surge como la forma de realizar el ordenamiento de las actividades en la ciudad. Utiliza para ello la figura del Planeamiento que lo desarrolla a través del ‘Plan’. Esta necesidad de controlar el crecimiento de las ciudades surge a mediados del siglo XIX, teniendo como objetivo fijar el modelo de ciudad que se desea, definiendo a su vez los medios para conseguirlo mediante los planes instrumentales, verdaderas herramientas operativas del urbanismo.

El Plan no tuvo como objetivo, ni tiene en general, pensar en la reducción de la demanda energética de los edificios, pasando a ser un mero ordenador de los edificios en la ciudad y no un instrumento poderoso de planificación eficiente como los modelos de ciudades griegas y romanas vistos anteriormente.

Tradicionalmente según Mazón T. (1997) los arquitectos y los ingenieros eran los que polarizaban el conocimiento y llevaban a cabo las acciones sobre el sistema urbano. Sin embargo, la creciente complejidad de las relaciones en las ciudades ha conducido a la incorporación de especialistas de diferentes áreas de conocimientos en los grupos urbanistas, lográndose de este modo un enriquecimiento al contarse con más puntos de vista, faltando todavía en la mayor parte de planificaciones la sensibilidad energética.

2.8.1. Planificación urbanística

Como punto de partida histórico del urbanismo en España, hay que hacer referencia al Real Decreto de 25 de julio de 1846, en el que se obligaba a realizar en las poblaciones importantes los Planos Geométricos, extendiéndose la obligación a todas las capitales de provincia y otras poblaciones que, además de ser ricas y extensas, tuvieran elementos para su progresivo desarrollo.

Antes de este decreto, la ordenación urbana se llevaba a cabo mediante los Reglamentos y Ordenanzas de Policía Urbana que incidían en procedimientos puntuales de actuación en la ciudad, en este caso la Ordenación del Territorio se dejaba en manos de los Ayuntamientos.

Según Mazón T. (1997) los Planos Geométricos no aportaron prácticamente nada nuevo al urbanismo español, llevándose a cabo muy pocas reformas y generando algunas nuevas calles, estableciendo una estructura jerarquizada.

Los ensanches en el siglo XIX surgen como nuevo modo de planeamiento para facilitar la expansión en las grandes ciudades en suelos urbanizables. La primer Ley de Ensanches de 29 de junio de 1864, derogada por la de 22 de diciembre de 1876, cuyo reglamento apareció el 19 de febrero de 1877, en un principio sólo ordenaba los crecimientos de Madrid y Barcelona.

Para complementar el planeamiento en el resto de España surge la Ley de 26 de julio de 1892, desarrollada con el reglamento de 31 de mayo de 1893.

Esta última Ley confería a los ayuntamientos la facultad de expropiación de las fincas o las parcelas necesarias para facilitar la apertura de calles, plazas o tramos, corriendo a cargo del ayuntamiento la urbanización de los terrenos. Hay que tener en cuenta en este punto que las ciudades estaban todavía rodeadas por murallas, generándose en esta época una saturación del interior de la ciudad que necesitaba del crecimiento en el exterior.

Los ensanches favorecieron el crecimiento de las ciudades, realizándose con tramas ortogonales, construyéndose edificios de viviendas que respetaban las alineaciones.

Los primeros planes de ensanche de las ciudades de Barcelona y Madrid correspondieron respectivamente a Ildefonso Cerdà y a Carlos M. de Castro. Para la aprobación de los planes se tuvo que permitir inicialmente la demolición de las murallas, generadoras de problemas de salud al haberse producido el hacinamiento de la población en su interior con crecimientos de epidemias mortíferas como la producida en 1821 en Barcelona por fiebre amarilla y de cólera en 1834 (Mazón T., 1997).

En la figura 2.36 se muestra una imagen del ensanche de Barcelona de Cerdà, que hay que recordar que no fue el ganador del concurso convocado por el Ayuntamiento de Barcelona en 1859, en el que obtuvo el primer lugar la planificación propuesta por Antonio Rovira y Trías (arquitecto). Sin embargo, según Jürgens O. (1992) el Gobierno Central, gracias a las influencias que poseía en Madrid Cerdà, impuso el proyecto de éste, aunque incluso había quedado fuera de concurso.

Tanto el desarrollo urbanístico de Cerdà como el de Castro en su ejecución sufrieron modificaciones, aumentándose la edificabilidad y perdiéndose los grandes patios interiores comunicados con el exterior. De este modo se ponía de manifiesto el eterno conflicto que surge entre la iniciativa privada y el ordenamiento racional, mostrándose el afán especulador en el ordenamiento de las ciudades.

La Ley de 18 de marzo de 1895 de ‘Obras de saneamiento y mejora interior de las grandes poblaciones’, permitió realizar Planes de Reforma Interior en ciudades de más de 300.000 habitantes, posibilitando las reforma de los cascos históricos adaptándolos a las nuevas necesidades del momento, existiendo en muchas actuaciones un trasfondo de interés especulativo.

El 8 de marzo de 1924 se publicó el ‘Estatuto Municipal’, que reconocía la facultad exclusiva de los ayuntamientos para elaborar y aprobar los proyectos de urbanización, estableciéndose por pri-

mera vez el carácter obligatorio para el Ayuntamiento de realización de los planes urbanísticos. Este documento fue la reordenación y fusión de la legislación anterior referente al planeamiento.

Para desarrollar los planes no se contaba con ningún tipo de programa ni de presupuesto, lo que condujo a que en esta época¹ se llevaran a cabo las propuestas más descabelladas por parte de los propietarios de suelo siempre y cuando éstos obtuvieran importantes beneficios.

En España el planeamiento sufrió un considerable avance con la aparición de la Ley de Régimen del Suelo y de la Ordenación Urbana de 12 de mayo de 1956. Ésta ha sido la base jurídica con la que se desarrolló la planificación urbanística hasta su reforma aprobada por el Real Decreto de 9 de abril de 1976, la elaboración de una nueva Ley de Suelo en 1992 y la corrección posterior a través de la Ley 8/2007 de Suelo que viene a corregir el bloqueo constitucional de su predecesora.



Figura 2.37 Plan de ensanche de Ildefonso Cerdà en Barcelona (Mazón T, 1997).

La Ley de 1956 plantea un marco jurídico con vigencia nacional, reconociendo que el planeamiento es la figura que creará la ordenación urbana, realizándose planes de diferentes niveles (Directores, Estructurantes e Instrumentales) que deben ser jerarquizados y no contradictorios respecto al planeamiento de orden superior.

La principal diferencia respecto a la planificación anterior radicaba en que los intereses colectivos prevalecían sobre los intereses particulares, reforzándose la posibilidad de la expropiación para llevar a cabo actuaciones de beneficio público.

¹ Fenómeno reproducido ahora hasta niveles nunca vistos

Con esta legislación, el carácter de propietario del suelo no otorgaba el derecho de edificar ya que previamente se tenían que cumplir determinadas obligaciones, como era la cesión de suelo, antes de adquirir el derecho de propiedad de la edificación. Siendo por lo tanto el plan el que facilitaba la concesión de un aprovechamiento limitado al propietario.

El principal problema de la Ley de 1956 fue que los gobernantes según Mazón T. (1997) cometieron el grave y deliberado error de no querer aplicarla. La modificación a la Ley del Suelo de 1976 intentó paliar la falta de aplicación de la legislación anterior adaptando algunos aspectos a las nuevas necesidades del momento.

La Ley del Suelo de 1992, que mantuvo el espíritu de la legislación anterior tratando de adaptarse al nuevo marco del Estado, fue declarada como inconstitucional en dos sentencias² debido a la falta de competencia del Estado en buena parte del texto refundido. Tras estas sentencias se produjo una situación de cierta desorientación normativa, debiéndose utilizar el texto refundido, prácticamente literal, de la Ley del Suelo del 1976.

Como complemento a la legislación española se aprueba la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre el ‘Régimen del Suelo y Valoraciones’, completándose la legislación de las diferentes autonomías.

Como etapa final del planeamiento urbanístico, ha surgido en las diferentes comunidades autónomas legislaciones propias que regulan los procesos de planeamiento, clasificando el suelo y definiendo el aprovechamiento urbanístico, como elementos más importantes del contenido de éstas.

En Aragón, la Ley 5/1999 de 25 de marzo, ‘Ley Urbanística’ regula el planeamiento a nivel regional, difiriendo respecto a la legislación nacional anterior en pocos aspectos importantes de forma global, e incorporando pequeñas diferenciaciones como la definición de la edificabilidad máxima residencial, el número de aparcamientos, o el supuesto expropiatorio de solares que contempla.

En el preámbulo de esta ley se recogen las siguientes palabras:

‘El origen directo de la presente Ley se encuentra en el reconocimiento de la plenitud de la competencia de la Comunidad Autónoma en materia de urbanismo, tras la declaración de inconstitucional, debida a la falta de competencia del Estado, de buena parte de los preceptos del Texto Refundido de la Ley del Suelo (Real Decreto Legislativo 1/1992, de 26 de junio), conforme a la Sentencia del Tribunal Constitucional 61/1997, de 20 de marzo.

‘El objetivo de la Ley no es – no debe ser – la realización de actividad urbanística, sino la regulación de ésta. La Ley adopta las grandes opciones institucionales, proporciona los instrumentos, técnicas y medios para que la Administración pueda poner en práctica el modelo urbanístico que se ajuste a las directrices políticas establecidas por el Gobierno, en el ámbito autonómico, o por el Ayuntamiento Pleno, en los Municipios.’

Para incidir en la reducción del precio de la vivienda y corregir la Ley del Suelo de 1992 se ha redactado la Ley 8/2007 de 28 de mayo del Suelo de carácter estatal. Como novedad esta Ley ga-

² Dichas Sentencias del Tribunal Constitucional son la 61/1997 y la 164/2001.

rantiza un mínimo de viviendas de protección pública con el objetivo de incidir en la reducción del precio de la vivienda, a la vez también plantea una preocupación clara por el medio ambiente debiendo realizarse una serie de estudios para tener en cuenta el impacto ambiental en nuevos desarrollos urbanísticos.

Es de esperar que fruto de esta nueva Ley del Suelo las Comunidades Autonómicas rehagan sus propias normativas para adaptarlas a esta normativa de carácter estatal.

En el apartado siguiente se muestran los parámetros del ordenamiento en Planes Parciales para el desarrollo urbanístico en suelo urbanizable.

2.8.2. Los Planes Parciales y los parámetros urbanísticos³

La figura del planeamiento habitualmente utilizada para desarrollar nuevas áreas urbanas es el Plan Parcial. El objetivo de éste es regular la urbanización y la edificación del suelo urbanizable, desarrollando el Plan General mediante la ordenación detallada de uno o varios sectores.

Los Planes Parciales están subordinados al Plan General, cuyas determinaciones no podrán modificarse, al ser este último de mayor rango. Si por ejemplo en el Plan General se ha fijado que una determinada área está reservada para viales o para zonas verdes, el Plan Parcial deberá respetar estas definiciones desarrollando los aspectos no contemplados en el Plan General.

En las diferentes Comunidades Autonómicas existen limitaciones paramétricas que se deben tener en cuenta en los Planes Parciales. A modo de ejemplo se muestra a continuación las limitaciones que existen en Aragón, siendo similares a las que existen en otras Comunidades:

- En cada sector del suelo urbanizable, no se podrá superar el límite máximo de edificabilidad de 8.500 m² de superficie residencial construida por hectárea, sin incluir equipamientos públicos.
- Deberán respetarse los módulos mínimos de reserva por cada 85 m² de superficie construida residencial, o de 100 m² de superficie construida industrial y de servicios. Estos módulos mínimos de reserva son:
 - 18 m² de terreno para espacios verdes, libres y de recreo, de dominio y uso público, cuya superficie no será inferior al diez por ciento de la total del sector, con independencia del sistema general de espacios libres públicos y de los equipamientos deportivos.
 - 10 m² de terreno para centros culturales y docentes, agrupados para formar unidades escolares completas.
 - Una plaza de aparcamiento, debiendo localizarse, al menos, la cuarta parte de las plazas resultantes en espacio de uso público, incluidos el subsuelo de

³ El fuerte impulso que ha recibido la construcción en los últimos años ha dado lugar a normativas permisivas, en general ignorantes de criterios ambientales y de sostenibilidad, no solo en zonas costeras (Levante y Sur de España), sino en poblaciones próximas a núcleos urbanos saturados provocando mayores desplazamientos y problemas de abastecimientos y servicios.

redes viarias y espacios libres, siempre que no se menoscabe el uso de los mismos.

- En las urbanizaciones privadas, los módulos anteriores de reserva podrán situarse en espacios de propiedad privada, dejando a salvo la potestad municipal de reclamar su mantenimiento y apertura al uso público.
- En las urbanizaciones turísticas, de segunda residencia, industriales, y de servicios, podrá destinarse la reserva de terrenos para centros docentes y culturales, total o parcialmente, a incrementar las reservas para espacios verdes, libres, deportivos y de recreo y para aparcamientos.

Los Gobiernos Autonómicos pueden suprimir y modificar, con carácter general, los módulos de reserva anteriores.

Mediante el Plan Parcial se definirá en los suelos urbanizables delimitados (nombre asignado en Aragón al suelo urbanizable) las características de la urbanización a desarrollar, fijándose los siguientes aspectos:

- Red de espacios públicos: trama de calles, plazas, zonas de aparcamiento en la vía pública, espacios verdes, etc.
- El sistema de espacios edificable, definiendo la disposición y geometría de las manzanas reservadas a los edificios.
- Parámetros dimensionales y tipologías de los edificios fijando la edificabilidad de cada parcela, la altura máxima permitida, la anchura máxima del edificio y las alineaciones y retranqueos que deben respetar las fachadas.
- Enunciado de los usos pormenorizados del suelo, debiendo cumplirse la asignación de intensidades y usos globales definidos en el Plan General.
- Determinación de las infraestructuras básicas de la urbanización: abastecimiento, saneamiento y suministro eléctrico.
- Cálculo económico del coste de la urbanización

En los Planes Parciales se debe incluir la siguiente documentación:

- Memoria de la justificación de la ordenación de las etapas para realizarla, y de los medios económico-financieros disponibles para desarrollarla.
- Planos del estado de terreno antes de realizar la actuación, incluyendo la topografía, la vegetación y las edificaciones existentes.
- Planos del proyecto, en el que se detallen la definición del viario y la limitación de espacios reservados a cada parcela edificable. Además se incluye el cálculo de las dotaciones de las infraestructuras de la urbanización así como los esquemas de éstas.
- Ordenanzas reguladoras en las que se definan los parámetros de cada parcela (edificabilidad, alineaciones, retranqueos, etc).

2.8.3. Reducción del consumo energético en urbanismo

El consumo energético de un edificio, como se muestra a lo largo de la tesis, depende principalmente del aislamiento, de la posibilidad y/o control del aprovechamiento solar y, consiguientemente, del acristalamiento y sombreadamiento existente en las diferentes fachadas.

En la escala del edificio el diseñador puede mejorar el consumo variando el nivel de aislamiento y las áreas vidriadas, pero si el edificio no posee una buena orientación o existe sombreadamiento entre los edificios el ahorro quedará bastante limitado.

Cuando el urbanista decide unos adecuados parámetros del área a desarrollar que permitan la captación solar invernal y localice los edificios con la mayor parte de fachadas al sur⁴, se habrán fijado unas adecuadas reglas del juego que hará que los arquitectos que diseñen los edificios a posteriori puedan hacer edificios de bajo consumo energético.

Teniendo en cuenta el carácter general del Plan de Ordenación, no parece prudente introducir condicionantes que podrían resultar de difícil o imposible aplicación en un caso concreto. Parece así que lo más apropiado sea incluir en el Plan General recomendaciones y la obligatoriedad de incorporar en los distintos Planes Parciales estudios de demanda energética y reducción de la misma por aplicación de aquellas recomendaciones que sean operativas ya que dichos Planes Parciales pueden ser una de las figuras más operativas para introducir los aspectos reguladores del urbanismo para un buen aprovechamiento solar, debiendo plantear un ordenamiento de calles y parcelas que lo favorezcan. El Plan podrá concretar las orientaciones más favorables así como la forma y la altura de los edificios con el objetivo de minimizar los sombreados entre edificios y favorecer la captación solar.

Un buen urbanismo que tenga en cuenta la captación solar es fundamental para contribuir a la reducción de las emisiones de CO₂ y fomentar el ahorro energético. Por ejemplo, en climas con carácter continental y en función del nivel de aislamiento, con sólo la orientación apropiada de un edificio se puede contribuir a reducciones significativas del consumo. Este caso podría ser el de dos edificios idénticos (aislamiento y acristalamiento), uno con sus fachadas principales orientadas al sur-norte y el otro con orientación este-oeste.

Si además el urbanismo planifica condiciones del entorno que favorezcan una mejora en el microclima, será posible obtener reducciones significativas en la demanda energética tanto en invierno como en verano. En este sentido la figura 2.38 muestra que las condiciones de confort para una velocidad del aire de 0,5 m/s se modifican elevando el valor de 25° recogido por el RITE como recomendación para temperatura interior de regulación de las instalaciones de enfriamiento hasta los 28°C. Esto lleva a que si la temperatura exterior se suaviza por el diseño urbanístico (arbolado para sombra, bajo albedo en calles y materiales permeables que no acumulen calor...) en un par de grados, queden muy pocas horas fuera de las condiciones “naturales” de confort que hagan innecesario el aire acondicionado.

Muchos urbanistas siguen pensando que el edificio orientado al este-oeste es mejor, dado que recibe la radiación solar por la mañana y por la tarde. Nada más lejos de la realidad, la mejor orientación para cualquier latitud como se demostrará en capítulos posteriores es la sur-norte.

⁴ O el criterio alternativo más apropiado cuando sea la refrigeración la necesidad energética considerada.

No sólo en invierno será buena esta orientación, también en verano la demanda de refrigeración es inferior en el edificio orientado al sur-norte. Este hecho tiene que ver con la trayectoria que describe el Sol, situándose cerca del cenit en el mediodía del verano y reduciendo la captación solar directa (en torno al 80% de la total) en la fachada sur del edificio. Sin embargo, por la mañana o por la tarde en un edificio orientado al este-oeste la radiación directa incide perpendicularmente sobre los acristalamientos y aumenta la necesidad de refrigeración.

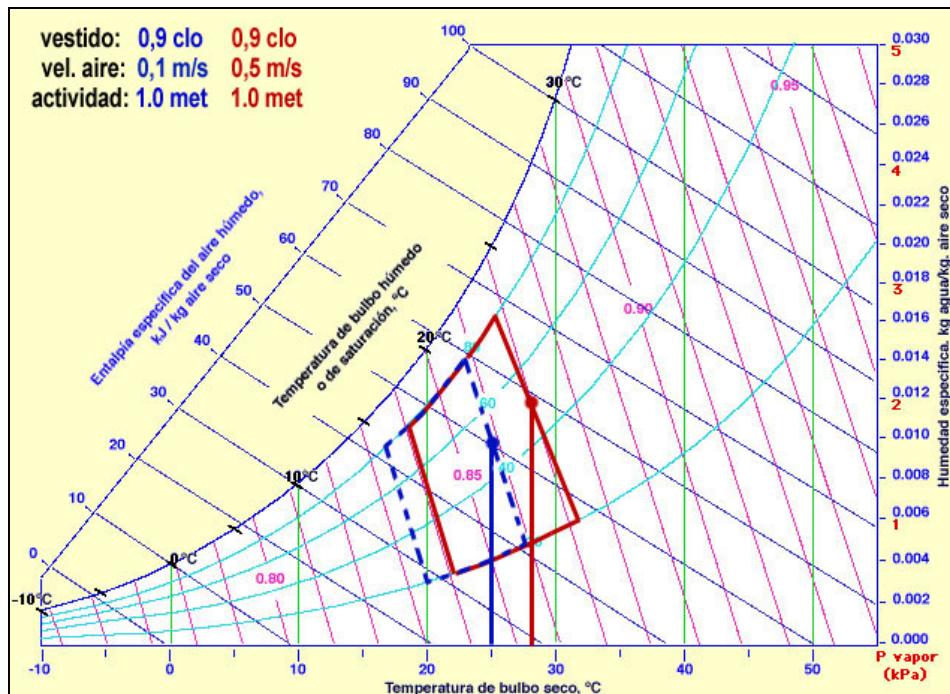


Figura 2.38 Diagrama de confort mostrando zonas de confort para diferentes condiciones ambientales

Si los edificios están bien orientados el arquitecto puede mejorar todavía más el edificio jugando con los niveles de aislamiento o acristalamiento y sombreado, pudiéndose alcanzar con reducidos sobrecostes un ahorro anual de energía que supere el 60%⁵.

La influencia en la definición de los parámetros urbanísticos (anchura de calles, altura de edificios, etc) particulares de un lugar desde el punto de vista energético viene condicionada por la severidad climática del lugar en que se ubicará la urbanización. Los principales factores climáticos que condicionan la selección de unos adecuados valores son la temperatura y la radiación solar.

De modo general el consumo energético de un edificio se puede reducir con las medidas que se plantean a continuación y que serían objeto de poder introducirlas en el Plan, debiendo aquilatarse con mayor precisión su importancia y el nivel de reducción de consumo en función del clima del

⁵ Hay que instar que los % que se dan sobre reducción en la demanda tienen más bien carácter orientativo ya que para un clima determinado es una combinación de aislamiento y ganancias solares, fundamentalmente, lo que definirá cuantitativamente el valor de esta reducción.

lugar, debiendo recurrir al método propuesto en la tesis y que está siendo implementado en la aplicación URSOS (Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza).

- Aislamiento:

La mejora del nivel de aislamiento generalizado del edificio reduce el consumo de calefacción y en menor medida la refrigeración, por lo que es una medida muy adecuada en climas fríos.

Para conseguir mejorar el aislamiento no sólo se debe actuar en los cerramientos del edificio (muros, cubierta, forjados, ...), también es importante utilizar acristalamientos con buenas características aislantes (doble vidrio) y aislar los puentes térmicos del edificio (frente de forjados, pilares, ...).

En climas cálidos es recomendable la utilización de fachadas y cubiertas ventiladas que reducen las necesidades de refrigeración y dotan de mayor inercia el edificio mejorando el confort térmico. De no utilizar este tipo de cerramiento se podría recurrir a utilizar colores claros en el acabado exterior que reduzcan la absorción de radiación solar.

- Infiltraciones:

Si para el clima analizado existen vientos moderados o fuertes, la utilización de carpinterías de poca calidad en las ventanas favorecerá las infiltraciones de aire indeseado aumentando las necesidades de calefacción. En estos casos es recomendable utilizar como medida carpinterías de calidad que reduzcan las infiltraciones o recurrir al uso de doble ventanas en las fachadas expuestas al viento predominante del invierno.

Por otro lado la utilización progresiva de carpinterías de mayor calidad debe combinarse con sistemas regulables de ventilación de modo que se garanticen las oportunas renovaciones de aire.

- Ventilación:

En climas cálidos la ventilación nocturna es una de las formas de reducir las necesidades de refrigeración de los edificios. Para favorecerla se deberán diseñar viviendas pasantes con doble orientación (sur-norte) que faciliten la circulación del aire a su través.

En invierno, si existe necesidad de calefacción el tiempo dedicado a la ventilación diaria debería ser lo menor posible, entorno a 20 minutos al día bastan para mantener unas condiciones del aire interior de la vivienda suficientemente buenas en viviendas con usos normales, supuestos los niveles de infiltración normales a través de puertas y ventanas.

- Ganancia solar:

La captación solar en invierno permite reducir las necesidades de calefacción. En climas fríos se puede aumentar el porcentaje de acristalamiento en el sur y minimizar el de la fachada norte, con el objetivo de contar con un balance positivo de captación solar que compense a las pérdidas por conducción a través de los huecos acristalados.

El porcentaje de acristalamiento tampoco debe exceder ciertos límites ya que puede contribuir a crear sobrecalentamiento en las viviendas, efecto éste indeseado. El óptimo quedará condicionado por el clima del lugar, el grado de aislamiento del edificio y el ni-

vel de inercia térmica del edificio, sólo una herramienta de cálculo que tenga en cuentas estos condicionantes podrá indicarlo.

En verano la captación solar es perjudicial incrementando las necesidades de refrigeración. Para eliminarla se puede recurrir a utilizar aleros o elementos que propicien sombreadamientos sobre los acristalamientos. Éstos sólo habrá que utilizarlos en las orientaciones con más captación (sur, este y oeste).

En las fachadas sur el elemento natural que protege de la captación solar son los aleros, permitiendo el aprovechamiento solar en invierno y la protección en verano. Sin embargo, en las fachadas este y oeste el alero no es un buen elemento de sombreado, teniendo que recurrir al sombreado externo (mallorquinas, toldos, etc).

Los planes parciales pueden permitir al urbanista incluir los condicionantes anteriores de diseño en los edificios que permitan reducir el consumo del edificio, por ejemplo, se puede exigir un aislamiento superior al fijado por la norma (NBECT-79, NRE-AT-87, CTE-2006, ...) o la utilización de acristalamiento diferenciado por fachadas. Un ejemplo de la introducción de estas medidas son los condicionantes bioclimáticos que tenían que cumplir los edificios en Residencial Parque Goya (Zaragoza, 1994). En el apartado 4.5 se muestran las medidas bioclimáticas incluidas en el Plan Parcial, mostrándose parte del texto original del Plan en el Anexo C.

Estas medidas basadas en los criterios de la Arquitectura Bioclimática fueron estimadas partiendo de cálculos medios mensuales realizados más elementales con la aplicación informática Peev (Cadem) y utilizando una implementación del Método 5000. El primer paso fue definir las formas y las características de los edificios simulando diferentes combinaciones de diseño que condujeron a unas recomendaciones de diseño que permitieran reducir el consumo energético de la urbanización en un 60%.

En este análisis se realizaban cálculos particulares para cada edificio con lo cual el proceso de análisis fue bastante laborioso, simulando cada edificio de modo independiente. Si hubiera existido un método como el propuesto en esta tesis, implementado en una aplicación informática, se podría haber reducido en una cantidad considerable el tiempo de cálculo.

Las conclusiones obtenidas en esta tesis facilitan la definición de los parámetros del ordenamiento a incluir en los Planes Parciales, permitiendo el ordenamiento de los edificios, la separación entre ellos en función de la altura máxima de éstos y la optimización de la combinación aislamiento – captación solar del edificio.

Los métodos de cálculo que se incluyen en los capítulos restantes tienen por objeto encontrar un modelo válido de análisis energético de urbanizaciones que permita optimizar los parámetros de diseño de nuevas áreas urbanas desde el punto de vista del aprovechamiento solar y por defecto de la contribución de las reducciones de las emisiones de CO₂, objeto de las nuevas políticas europeas en materia de edificación.

2.9. Introducción de aspectos reguladores energéticos en urbanismo⁶

La planificación energética en el sector residencial se mueve en diversos niveles que van desde el más general, la Comisión Europea, hasta el más próximo del régimen local en cada municipio. Su aplicación se mueve también en dos esferas diferentes, la pública, en general más sensible y pre-dispuesta a desarrollar medidas innovadoras de planificación, y la esfera privada, en general más reñente. Puede interpretarse esta situación, por lo que corresponde a las instituciones públicas, como el primer efecto notable de preocupación ante la situación ambiental cuya evolución se presume claramente problemática.

La forma práctica en que se desarrolla cada nivel de planificación incluye aspectos diferentes: financiación de programas de investigación, desarrollo y demostración específicos (estas actuaciones se limitan a los niveles superiores de la gestión, niveles: UE, el estado, y en diferente nivel de actuación cada autonomía), normativas (en cada nivel aparecen las propias de dicho nivel con diferente carácter: leyes, reglamentos, ordenanzas...).

En este último aspecto puede mencionarse 1) la legislación comunitaria en torno al concepto de certificación de edificios (traspuesta recientemente), 2) la nueva normativa estatal sobre la edificación que afecta a todos los aspectos y que, en particular, renueva la NBECT 79, que data del año 79, como su propio nombre recoge. En el nivel autonómico aparece legislación regulando el desarrollo de los procesos de certificación, normativas reguladoras de la actividad en el sector de renovables, normativas específicas sobre instalaciones de colectores solares. Por último en el nivel de los ayuntamientos aparecen ordenanzas en el marco del Plan General de Ordenación Urbana regulando diversos aspectos, sea sobre condiciones de diseño de carácter general, sea sobre aspectos más concretos sobre instalaciones y su impacto ambiental, o estimulando el desarrollo de medidas de ahorro y eficiencia o incorporación de energías renovables (fundamentalmente colectores solares).

En este sentido del estímulo de acciones de mejora o sustitución de energías convencionales por energías renovables, el marco normativo es por demás ambiguo y paradójico. Por ejemplo, recientemente aparecen normativas de rango estatal autorizando a los ayuntamientos a desarrollar líneas de apoyo a las acciones antes citadas con reducción de tasas, impuestos, etc. Lo paradójico es que junto a la ley no aparece el concepto presupuestario que apoyará la mencionada reducción. Un ejemplo emblemático de este tipo de legislación es la ley del BOE de mediados de los 90 que permitía aumentar hasta un 15% el precio por m² de las viviendas VPO que tengan diseño bioclimático. Lo sorprendente del legislador esta vez no es la ausencia de consignación presupuestaria, innecesaria pues el pagador era el propio beneficiario, sino que la indefinición del concepto bioclimático en el contexto utilizado hacía inviable que los responsables de la autorización, las Comunidades Autónomas, utilizaran la mencionada legislación. Así, pese al valor intrínseco de la citada ley no se conoce ningún caso en que se haya aplicado.

Como línea realista de aplicación normativa surgen las opciones en el plano de la ordenación urbanística. Hay diversas experiencias de esta circunstancia que se pueden acomodar a tres modelos de actuación. Revisaremos primero el marco general, los objetivos y las posibles acciones:

⁶ En lo que sigue no incluimos consideraciones sobre compacidad/complejidad urbanas o movilidad, aspectos estos de suma importancia pero que intervienen en un nivel de análisis que se escapa del alcance de esta tesis.

El marco general es la puesta en marcha de un plan parcial con la finalidad de poner en el mercado una reorganización del suelo, sea por concentración y reordenación de espacios previos sea por recalificación de suelo previamente no urbanizable.

Los objetivos son, básicamente,

- organizar el nuevo espacio de manera que sea aprovechable, desde el punto de vista de la atención y reducción de las necesidades energéticas, en la mayor medida posible
- definir las condiciones mínimas que debe cubrir el diseño de los edificios de acuerdo con el objetivo anterior
- poner en marcha actuaciones que garanticen el adecuado cumplimiento de los objetivos anteriores, sea mediante selección en concursos de suelo edificable cuando sea el caso y, en todo caso, mediante el desarrollo de medidas de seguimiento –certificación, mediciones de condiciones de confort y consumos, medición de la energía suministrada por los sistemas auxiliares y de energías renovables-.

En cuanto a los recursos o acciones que permitan cumplir los mencionados objetivos, se concretan en:

- Leyes de carácter general: La NBE CT79 era claramente insuficiente y en cuanto al nuevo Código Técnico es más aceptable en cuanto a los criterios de aislamiento pero contradictorio e insuficiente en cuanto al diseño bioclimático y el aprovechamiento pasivo. Por todo ello, son de importancia significativa los siguientes niveles.
- Plan General de Ordenación Urbana: Presenta una ventaja clara pues afecta a todos los desarrollos posteriores del mismo. En las limitaciones debemos incluir que, ya que afecta a todo tipo de posibles situaciones, la definición de medidas no puede ser exhaustiva y en la mayor parte de las posibles actuaciones debe limitarse a definir recomendaciones. Sí puede, y debe, exigir un estudio energético del planteamiento urbanístico con explicitación de aquellas recomendaciones adoptadas y justificación de las no aplicadas
- Plan Parcial: En este nivel debe configurarse, fundamentalmente, el espacio físico con concreción de orientación de fachadas, separación de edificios, edificabilidad más apropiada y, consiguientemente la altura, además de definición de sistemas generales en cuanto a producción de energía auxiliar, instalación de renovables, reciclaje de residuos, doble circuito de agua, recuperación, etc. Estrictamente hablando, no se necesita descender a las condiciones que deben cumplir los edificios, siempre que esta característica pueda materializarse dentro de un proceso de asignación de parcelas a través de concurso público (caso de suelo público). En caso contrario será necesario definir en el capítulo de Normativa Urbanística del Plan Parcial todas las especificaciones que permitan cubrir los objetivos antes citados.
- Pliegos de condiciones del concurso de parcelas: Esta opción, solamente aplicable en el caso del sector público, es la que permite una concreción mayor de medidas pues pueden definirse para cada parcela en particular, atendiendo así, de manera precisa, las peculiaridades que pueda tener el espacio correspondiente. Sirve también para modular lo definido previamente en el caso de que presente inconsistencias o limitaciones.

No conocemos actuaciones desarrolladas en el sector privado en que se haya puesto en marcha un análisis riguroso de aprovechamiento de energías renovable, aunque muy recientemente existen estudios en marcha. En el sector público son cada vez mayores las iniciativas que pretender configurar espacios más o menos sostenibles.

Tal como se han venido hasta ahora desarrollando nuevas áreas urbanas, los Planes Parciales han servido tan sólo para ordenar los usos y aprovechamientos del desarrollo. Un paso más desde el punto de vista energético es dotar en el Plan a los edificios de buenas orientaciones y de ausencia de sombreado, para ello basta con pensar tan sólo en la trama de viales que facilite estas parcelas y en la limitación de altura mediante la edificabilidad.

Si el urbanista incluyera en el Plan estas consideraciones habría contribuido sobremanera para que el arquitecto pudiera diseñar un edificio todavía más eficiente. Sin embargo, podría ocurrir que un arquitecto primara otros condicionantes anulando el aprovechamiento energético, por ejemplo, acristalara en mayor porcentaje una fachada sur frente a una norte, o colocará los huecos de escaleras al sur.

Ante estas posibilidades de inefficiencia el Plan Parcial debería contener además una serie de obligaciones o recomendaciones que facilitara al diseñador la guía para obtener un edificio de bajo consumo. Conviene tener en cuenta que el número de arquitectos expertos en arquitectura bioclimática es reducido, no contando la inmensa mayoría con unos conocimientos suficientes para optimizar energéticamente el diseño de un edificio.

Pueden existir diferentes niveles de concreción en el planeamiento que se pueden complementar con la figura del concurso para mejorar los edificios. Las posibilidades que pueden existir se incluyen en los siguientes subapartados.

Un último aspecto de difícil tratamiento es la actitud del usuario. Es fundamental concienciarlo de que las medidas de eficiencia deben ir acompañadas de una actitud consciente, no sólo de aprovechamiento del diseño sino de ahorro personalizado frente a una actitud de derroche al constatar lo reducido del gasto energético.

2.9.1. Planeamiento con escasa o nula definición

Cuando se realiza un planeamiento al uso tradicional realizando una disposición de edificios y formas de éstos que no ha sido optimizada, se puede aplicar el recurso de hacerla ‘bioclimática’ mediante unas normas de concurso que recojan las características o recomendaciones que deben tener los edificios.

En este caso el consumo energético de los edificios no será uniforme ni corresponderá con el que se podría haber tenido con una urbanización bien planteada.

Este es el caso, por ejemplo, de la urbanización de la Ecociudad de Sarriguren (Navarra) de 4.600 viviendas (ver figura 2.36) donde se partió de un concurso restringido de urbanismo para seleccionar una de las propuestas. El ganador presentaba una propuesta en la que no se realizaron estimaciones energéticas, ni del ahorro esperado en la urbanización. El análisis simplemente cualitativo llevó a una abundancia de edificios en manzana cuadrada, torres, unifamiliares mal orientados, ... que limitaban seriamente la posibilidad de una reducción significativa de la demanda, al margen, de las exigencias que posteriormente se plantearon para cada edificio.

Ante una urbanización diseñada de este modo la única solución es incluir las medidas en el concurso de las parcelas si se quiere hacer una urbanización medianamente eficiente.

El Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza fue contratado posteriormente por Nasursa, empresa responsable del desarrollo de Sarriguren, para ver cómo se podía mejorar la urbanización. El Grupo planteó modificaciones de tipologías de edificios, cambios de orientación de edificios..., finalmente estos cambios de ordenación no se llevaron a cabo y se ha tratado de compensar la ineficiencia del ordenamiento urbanístico con exigencias en el Plan Sectorial y en el concurso, principalmente, de mejora de los niveles de aislamiento respecto a los fijados por la NBECT-79.

El concurso planteaba en su mayor parte recomendaciones y no condicionantes, por lo que los arquitectos podían seguirlas o no, siendo el peso del resto de puntos los que atendía cada promotora al objeto de ganar el concurso de la parcela.

A diferencia de Residencial Parque Goya la puntuación de los aspectos bioclimáticos era muy reducida, no siendo necesario un esmero en el diseño con estos aspectos para ganar el concurso, propiciando que muchos de los edificios ganadores no sean tan eficientes como podían haber sido.

Con medidas como aumentar el peso del diseño bioclimático o haber incluido más condiciones bioclimáticas como obligatorias se podría haber llegado a un ahorro del 60% en los edificios bien orientados. El resto no podía aspirar sino a un 30% con fuertes niveles de aislamiento.

Este tipo de planeamiento no es indicado, siendo preferible que la urbanización se diseñe desde un principio pensando en aprovechar al máximo la captación solar en los edificios. Esta medida no encarece el coste de la urbanización ni de los edificios, al contrario de tener que introducir mayores niveles de aislamiento u otras estrategias en los edificios para compensar las desviaciones de orientaciones o los sombreadamientos arrojados.

2.9.2. Planeamiento con evaluación energética más normas de concurso

Cuando se ha realizado un trazado de calles apropiado y las parcelas en las que se ubiquen los edificios permiten un aprovechamiento óptimo de la captación solar y un reducido nivel de sombreadimiento entre edificios, se acaban de sentar las bases de una buena urbanización que permitirá tener un reducido consumo energético.

En esta fase todavía no está diseñado cómo será el edificio que ocupe cada parcela, pero se conocen aproximadamente sus formas y tamaños, factores que permiten realizar simulaciones energéticas para optimizar los edificios.

En esta modelación se pueden estudiar los niveles de aislamiento y los acristalamientos que se pueden incluir en el Plan Parcial o en las normas del concurso para la enajenación de las parcelas.

El diseñador partiendo del objetivo de ahorro energético que se persigue puede poner unas reglas para conseguir estos objetivos. Residencial Parque Goya (figura 2.33) es un ejemplo de este tipo de planeamiento basado en un análisis urbanístico y posteriormente en la redacción de aspectos obligatorios o recomendaciones en el Plan Parcial.

Se podría pensar a priori que no es interesante para los arquitectos y promotores concursar en este tipo de edificación al suponerles sobrecostes que no tienen en otras actuaciones. Sin embargo con un precio de venta adecuado del suelo las condiciones son interesantes como lo demuestra que en

Residencial Parque Goya se han presentado de media 10 equipos por parcela, número incrementado en el caso de la urbanización de Valdespartera de Zaragoza.

En este caso al igual que en el caso anterior de planeamiento, se premia la inclusión de las recomendaciones en la valoración del concurso, siendo necesario recompensar con un porcentaje de valoración suficiente el mayor esfuerzo de quien introduce las recomendaciones.

En Residencial Parque Goya con este tipo de planificación y siguiendo las indicaciones obligatorias se ha conseguido un ahorro energético de los edificios monitoreados de un 60%, llegándose a alcanzar en algunos casos que incluyeron los aspectos voluntarios hasta un 80%.

Comparativamente es más eficiente esta segunda planificación respecto a la primera y no supone incrementos de costes.

2.9.3. Planeamiento que utiliza la ordenanza como soporte de la mayor parte de las condiciones bioclimáticas

El último tipo de planificación es el que marca en el Plan Parcial todos, o una gran mayoría, los aspectos como obligatorios, siendo similar a una ordenanza reguladora de obligado cumplimiento. Se debe partir de una buena distribución de las parcelas e incluir en el Plan todos los aspectos bioclimáticos para que el arquitecto tan sólo tenga que seguirlos para diseñar un edificio de bajo consumo energético.

El ejemplo de este tipo de planificación se encuentra en Valdespartera, 9.600 viviendas bioclimáticas en Zaragoza. Partiendo de la experiencia que se tenía en Residencial Parque Goya el GEE en colaboración con el Ayuntamiento de Zaragoza redactó la normativa reguladora del Plan.

El objetivo es superar más del 60% de ahorro energético en climatización y como mínimo un 30% de las necesidades de agua caliente sanitaria, que será finalmente del 50% por las limitaciones que existen según el RITE de 1998 al no entrar en vigor el CTE cuando se redactaron los proyectos de los edificios.

En el concurso de las parcelas tan sólo tiene que valorarse el cumplimiento o no de las normas bioclimáticas ya que los edificios estarán optimizados al máximo en relación a los sobrecostes asumibles.

Este tipo de planeamiento no sólo se puede aplicar en un Plan Parcial, también podría ser de aplicación en todo el municipio, pasando a convertirse en una Ordenanza del Ayuntamiento de obligado cumplimiento en todas las actuaciones urbanísticas o en el diseño de edificios.

Este gran paso está próximo a realizarse en Zaragoza en breve tiempo, sirviendo de acompañamiento a la Ordenanza de Captadores Solares Térmicos en redacción. Esta ordenanza, necesariamente flexible en los aspectos urbanísticos por la singularidad de cada actuación, introduce la exigencia de documentar el proyecto urbanístico con una memoria de eficiencia energética que justifique la imposibilidad de aplicar el conjunto de recomendaciones que se establecen en cuanto a la planificación urbanística.

En esta misma línea se está apostando también en la Comunidad Foral de Navarra estando cercana la realización de una normativa específica bioclimática para los municipios del Valle de Egües, que será de obligado cumplimiento para todos los edificios.

La aplicación de este tipo de planeamiento no se debe copiar de unos lugares a otros al existir diferentes condicionantes climáticos, pudiéndose pensar que se desarrollarán este tipo de Ordenanzas con ligeras modificaciones para cada zona climática, imitándose el proceso que ha supuesto el despegue de las diferentes Ordenanzas de Captadores Solares Térmicos que comenzó en Berlín y que en España se ha generalizado a través de la Ordenanza de Barcelona, siendo multitud de ayuntamientos los que han puesto en marcha su propia normativa.

Capítulo 3

Balance energético de edificios y método de modelación propuesto

En este capítulo se aborda el balance energético de edificios con un análisis de métodos de cálculo y simplificaciones que se recogen en detalle en el Anexo D. El objetivo es definir los algoritmos de cálculo que proporcionen resultados suficientemente precisos del balance energético de edificios teniendo en cuenta las perdidas energéticas, las ganancias solares y los sombreadamientos propios y externos. Éstos deben posibilitar el desarrollo de una aplicación informática general, que cubra determinados requisitos de diseño como ser una aplicación ágil, simple, cómoda de uso y con cálculos con errores medios no significativos.

Dado que el propósito es encontrar un método de análisis energético que permita en la fase de planteamiento urbanístico optimizar energéticamente la demanda de la urbanización como conjunto de edificios y aun no están definidas las características específicas de cada uno de ellos, no será adecuado utilizar un método detallado, en el que sería necesaria una gran cantidad de parámetros todavía por definir. Por esta circunstancia el método que se proponga deberá ser un método simplificado.

Esto no supone limitación en el análisis sino una simplificación en las características básicas de los edificios que, en el tercer nivel, el del diseño específico, podrán definir condiciones que mejoren el aprovechamiento mínimo garantizado por el diseño general definido. En esencia, el método que se plantea trabaja con unos edificios perfectamente posibles pero definidos con parámetros específicos al objeto de facilitar el análisis en el segundo nivel.

En este sentido, para que la aplicación o método propuesto sea reconocido como válido, se debe contrastar la demanda obtenida para un edificio patrón (CTE, 2006) respecto al que proporciona una aplicación reconocida. Por ejemplo, la norma UNE-EN-832 (2000) plantea un edificio patrón de simulación al igual que la Agencia Internacional de la Energía (IEA).

Así, para la validación del método propuesto en la tesis, se han realizado comparaciones con cinco tipos de edificio y se les ha sometido a seis climas diferentes. El contraste realizada con estas 30 configuraciones es más amplia que la planteada por el CTE o la IEA, utilizándose como programa de contraste la aplicación informática de TSBI3 (1997), basada en el cálculo dinámico y evaluada como una de las mejores a escala internacional por Lomas K.J. et al (1995).

Al final del capítulo se presenta el método propuesto de cálculo energético de edificios que se puede emplear para realizar el análisis y la optimización de áreas urbanas, resultando suficientemente preciso y fácil de utilización una vez implementado, por ejemplo, en la aplicación URSOS del Grupo Energía y Edificación, que como se ha señalado ha recibido el apoyo económico del

IDAЕ para su desarrollo y posterior distribución a gabinetes urbanísticos y responsables municipales del planeamiento.

3.1. Balance energético de edificios con demanda de calefacción

Para mantener unas condiciones de confort prefijadas en un edificio o en un recinto, es necesario habitualmente el aporte complementario de energía proveniente del sistema de climatización que es el que compensa el balance energético desfavorable hasta alcanzar la situación de confort.

El balance de energía (BE) de un recinto en el cual se fijan unas condiciones de confort y sometido a unos factores climáticos que supongan la necesidad de aportes de calefacción, a grosso modo podría plantearse como:

$$BE = (Q + V) \pm (S + I) \quad [3.1]$$

Q : representa las pérdidas a través de los cerramientos del edificio gobernadas por los modos de transferencia de: conducción, radiación y convección.

V : pérdidas por ventilación (renovación de aire) e infiltraciones.

\pm : se realiza la sustracción para el período de invierno ya que las ganancias reducen las necesidades de calefacción, mientras que para verano se realiza la suma al aumentar las ganancias la carga de refrigeración.

S : representa los aportes solares a través de los cerramientos.

I : aportes internos de energía, tanto los debidos al empleo de aparatos eléctricos (iluminación, máquinas, etc.) como los debidos a la presencia humana.

Para mantener las condiciones de confort, el sistema de climatización deberá aportar la energía BE , la cual equilibra el balance de energía.

Los procesos de intercambio térmico son temporales, debido a las fluctuaciones de las solicitudes tanto exteriores como interiores, por lo que las ecuaciones que rigen la transferencia de calor serán no estacionarias y el problema a tratar será de tipo transitorio.

Todos los mecanismos de transferencia de energía existentes en un edificio se encuentran acoplados, y no se pueden calcular de modo independiente. Para la resolución del balance habrá que recurrir a resolver estas ecuaciones que proporcionarán la evolución de la temperatura del recinto analizado.

El análisis energético del recinto se debe abordar mediante las ecuaciones que rigen la transferencia térmica en los cerramientos [3.2 y 3.3] y la del equilibrio del aire interior del recinto [3.4]. Por recinto se entiende todo aquel espacio que contiene aire en su interior y que está limitado por cerramientos.

A continuación se abordan estas ecuaciones que están acopladas entre sí y además son función del tiempo, por lo que su resolución es compleja, debiéndose resolverse simultáneamente.

3.1.1. Balance energético de los cerramientos

Para cada uno de los cerramientos del recinto se tiene que analizar la transferencia de energía para cada una de sus capas [3.2] y el intercambio energético que existe en las superficies que limitan el cerramiento con el ambiente interior o con el exterior [3.3], cada uno de estos modos de intercambio se produce en régimen transitorio estando además acoplados entre ellos, por lo que no se podrá calcular de forma independiente siendo incluso función de las temperaturas alcanzadas en las zonas con las que limita.

Existe asimismo, un acoplamiento directo entre los cerramientos debido al intercambio radiante entre ellos y uno indirecto por mediación del aire interior. Teniendo en cuenta todo ello, las ecuaciones que expresan el comportamiento térmico de un recinto, suponiendo N superficies de contacto con el aire interior al recinto y L fuentes internas serán:

- Para cada capa de un cerramiento, una ecuación de Fourier (Clarke J.A. 1985):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{c_p \rho}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad [3.2]$$

λ : conductividad térmica del material

c_p : calor específico del material

ρ : densidad del material

(T: temperatura; t: tiempo; x: dimensión espacial)

- Para cada superficie interior (o exterior), un balance de energía por unidad de área (Álvarez S. 1991):

$$\underbrace{-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_j}_1 = \underbrace{h_i [T_i - T_{Ai}]}_2 + \underbrace{\sum_{j=1}^N c_{ij} \sigma (\varepsilon_j T_j^4 - \varepsilon_i T_i^4)}_3 - \underbrace{\phi_c}_4 \quad [3.3]$$

h_i : coeficiente de convección superficial de la cara interior (o exterior)

T_i : temperatura en la superficie i

T_{Ai} : temperatura del aire interior (o exterior)

c_{ij} : factor de vista entre la superficie i y la j

T_j : temperatura de la superficie j

ε_j : emisividad de la superficie j

σ : constante Stefan Boltzman ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$)

ϕ_c : radiación de longitud de onda corta absorbida (sol, lámparas, etc)

Los diferentes términos de la ecuación [3.3] representan los diferentes intercambios energéticos que se producen en la superficie de un cerramiento: conducción (1), convección (2), intercambio radiante de longitud de onda larga (3), radiación de longitud de onda corta (4).

3.1.2. Balance energético del recinto

El balance de energía (Santamouris M. 1997) que rige el comportamiento térmico del recinto es el mostrado en la siguiente ecuación.

$$\underbrace{mc_p \left(\frac{\partial T_{Ai}}{\partial t} \right)}_1 = \underbrace{\sum_{i=1}^N S_i h_i [T_i - T_{Ai}]}_2 + \underbrace{\rho c_p V [T_{Ae} - T_{Ai}]}_3 + \underbrace{\sum_{k=1}^L \phi_k^1}_4 \quad [3.4]$$

m : masa de aire interior

T_{Ai} : temperatura del aire interior

S_i : área de la superficie i

h_i : coeficiente de convección de la superficie i

T_i : temperatura de la superficie del cerramiento i

ρ : densidad del aire

c_p : capacidad calorífica del aire

V : volumen del aire

T_{Ae} : temperatura del aire exterior

ϕ_k : convección de fuentes internas

Los diferentes términos de la ecuación [3.4] representan: variación de la energía interna (1), convección (2), infiltraciones y ventilación (3), convección procedente de fuentes internas (4).

Al aplicarse la ecuación [3.4] al balance del recinto queda patente que la temperatura del aire de la zona analizada (T_{Ai}), entre otros términos, es función de las temperaturas superficiales de los cerramientos (T_i) que la envuelven, resultando el análisis un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, que en general, tendrá carácter no lineal. El sistema de ecuaciones está compuesto por la unión de la ecuación del balance del recinto [3.4], la transferencia para todas las superficies de los cerramientos [3.3] en contacto con la zona y la transmisión interna que se produce en el interior de cada uno de los cerramientos [3.4].

Para resolver este sistema se deberá realizar un conjunto de hipótesis simplificadoras de naturaleza muy variable. A partir de dichas hipótesis es posible desarrollar una serie de métodos que permiten analizar la transmisión de energía en un recinto y por tanto, conocer la temperatura en el interior a lo largo del tiempo.

No existe ningún método que resuelva con total precisión el sistema de ecuaciones diferenciales planteado (ASHRAE 1997). Como mínimo se requieren tres hipótesis simplificadoras válidas en

primera aproximación que son comunes a la totalidad de los métodos, con independencia de su grado de detalle posterior:

1. Las transferencias de energía por conducción son unidireccionales. Es decir, los efectos de borde son poco significativos en relación con la transferencia normal a las superficies.
2. Las transferencias por conducción están regidas por ecuaciones diferenciales lineales, es decir, las propiedades termofísicas de los cerramientos son constantes. Esta hipótesis será tanto más cierta cuanto más homogénea sea la composición del cerramiento considerado.
3. La temperatura del aire interior es uniforme, es decir, no hay estratificación. Todo el volumen de aire interior de un recinto tiene la misma temperatura, lo cual parece lógico si se considera que no hay gradientes excesivamente elevados en el interior.

3.2. Métodos de cálculo

Para resolver el balance energético de un edificio existen varios métodos de cálculo que aplican simplificaciones diferentes para la resolución del balance. En el Anexo D se ha incluido una revisión de los métodos simplificados más habituales.

Como se decía en la introducción, los métodos se dividen en simplificados o detallados. En los primeros se realiza un cálculo estático utilizando valores medios mensuales y en los otros se incorporan modelos dinámicos que permiten el estudio del perfil diario de la demanda energética.

En algunos casos se introduce una modificación a los métodos estáticos para tener en cuenta en cierto modo el comportamiento dinámico. Esta aproximación se realiza modificando la ganancia solar reduciéndola a una ganancia útil una vez conocido el grado de inercia térmica del edificio. Estas aproximaciones se han introducido por ejemplo en el Método 5000 (Claux P. et al. 1982) y en la norma UNE-EN 832 (2000).

En los métodos detallados o dinámicos, la resolución del balance energético no es directa, y hay que recurrir a utilizar diferentes estrategias para resolverlas. Los dos métodos más usuales son (Clarke J.A. 1985):

- Modelación en el dominio del tiempo y de la frecuencia de la respuesta.
- Aplicando el método numérico de diferencias finitas al balance energético para volúmenes de control.

Según la norma UNE-EN-832 (2000), cuando se utilizan datos de entrada idénticos para todos los modelos, las diferencias entre las necesidades de energía calculadas con este método simplificado corregido y los calculados por un modelo dinámico completo no son más importantes que las diferencias obtenidas por la utilización de modelos dinámicos diferentes.

Los diferentes métodos han sido implementados en multitud de aplicaciones informáticas¹ de las cuales las más conocidas (Lewis O. et al 1999) se muestran en la tabla 3.1.

¹ Estas aplicaciones utilizan métodos de cálculo similares a los empleados en las herramientas oficiales para cumplimiento del CTE-HE1 (programa LIDER) o para la certificación de un edificio (Calener VyP y Calener GT), incluso Calener GT utiliza para el cálculo la versión de DOE2.2.

En el Anexo D se detallan varios métodos de cálculo, siendo el objetivo de esta exposición detectar los parámetros necesarios en cada tipo de modelo de simulación.

Una vez conocidos éstos se deberá seleccionar el modelo de evaluación a desarrollar en la tesis, pensando siempre en su aplicación en el nivel 2, la fase de diseño urbano, en la que es limitado el grado de definición existente. En esta fase se conoce el entramado de calles y la forma básica que podrán tener los edificios, pero se desconoce el tipo de cerramientos de los edificios, las carpinterías a utilizar, etc.

Hay que hacer constar que la demanda anual de un edificio obtenida con programas de simulación horaria y con métodos mensuales no debe variar significativamente siempre y cuando se apliquen similares condiciones de uso, geométricas e idénticas características de los cerramientos.

La ventaja fundamental de los primeros sobre los segundos es, precisamente, esa simulación horaria que permite determinar la evolución de temperaturas en cada espacio analizado del edificio estudio. Si, además, aplicamos perfiles climáticos con condiciones extremas no mediadas -caso de los métodos estáticos- esta evolución recogerá de manera fidedigna, función de la calidad de la simulación, el perfil ambiental de temperatura del espacio analizado permitiendo detectar sobrecalefunciones en parte o en todo el edificio.

Método de cálculo	Nombre
Estático o simplificado (cálculo medio mensual)	LPB3 y LPB5 Método 5000 Admittance Method
Dinámico o detallado (cálculo horario)	DOE ESP TSBI3 ² PASSPORT -Plus SERI-RES TRNSYS HTB2

Tabla 3.1. Aplicaciones informáticas para la obtención del balance energético de edificios. (Fuente: Lewis O. et al, 1999)

La demanda de energía obtenida mediante simulación se basa en unas condiciones particulares de uso del edificio. Bajo éstas, con diferentes aplicaciones informáticas basadas tanto en modelos simplificados o dinámicos se obtendrán valores similares. Esta circunstancia permite realizar la optimización del diseño del edificio pudiendo mejorar la eficiencia de éste.

Sin embargo, si una vez construido el edificio se analiza su demanda real se pueden producir variaciones de hasta $\pm 50\%$ de la demanda respecto al de simulación (UNE-EN 832, 2000). Estas

² En la actualidad existe una nueva versión que actualiza TSBI3 denominada BSIM. Entre las dos existe sólo una diferencia en el entorno gráfico empleado en esta última, haciéndolo más intuitiva al basarse en los estándares de Windows (botones, menús, pantallas, etc).

variaciones no se deben a que los métodos no se aproximen a la realidad sino a que el uso de las viviendas puede ser diferente al planteado inicialmente al definir el edificio en los simuladores. Esta dispersión incorpora también la posibilidad de que el clima particular del periodo analizado puede diferir del valor estadístico medio empleado en las simulaciones.

Las diferencias más habituales de uso respecto al diseño inicial radican por ejemplo en la utilización de valores en el termostato de control más altas, deficiencia o exceso de ventilación de viviendas, uso inapropiado de cortinajes y persianas, diseño incorrecto del sistema de calefacción, o incluso el apagado de la calefacción³.

Una muestra de estas actitudes se ha comprobado en los resultados de monitorización del proyecto de investigación Thermie nº BU 178/95 ‘Residencial Parque Goya’ (Zaragoza), en el que participaron como grupos de I+D la Universidad de Zaragoza (Grupo de Energía y Edificación, coordinador), Ciemat e Institut Cerdà (ambos como partner). En apartado 4.5.5 se muestran diferentes ejemplos de mal uso de las viviendas que comportan incrementos del consumo y de la demanda original.

De lo dicho puede afirmarse que la utilización de los métodos de simulación sirve en la fase de prediseño, fundamentalmente, para discernir entre diferentes soluciones, en las que se comparan demandas obtenidos bajo las mismas condiciones y las diferencias entre distintos modelos serán secundarias si están dentro de un rango determinado pues la realidad será, en general, más divergente.

En el Anexo D se ha incluido una revisión de los diferentes métodos simplificados más utilizados, entre los que se encuentran:

- Método de los grados día (calefacción y refrigeración).
- Método 5000 (calefacción).
- UNE – EN 832 (calefacción).
- Método de cargas de refrigeración (Santamouris M. 1997).

De todos los métodos simplificados, en la tesis se seleccionará como método de cálculo el Método 5000, al que se le realizarán algunos ajustes. Uno de los principales motivos por el que se ha elegido como base para el cálculo el Método 5000 radica en que incluye la implementación de elementos bioclimáticos, a diferencia del resto de métodos analizados.

En cuanto a métodos dinámicos o detallados, en el Anexo D se expone el método utilizado en la aplicación TSBI3 (1997), el cuál realiza cálculos dinámicos horarios del comportamiento del edificio. La elección de esta aplicación es por la precisión de sus resultados, de acuerdo con los resultados del proyecto auspiciado por la International Energy Agency (IEA) sobre la validación y facilidad de uso de diferentes aplicaciones dinámicas enunciadas en la tabla 3.2. Dentro de estos

³ Un objetivo del proyecto Renaissance, uno de cuyas participantes es el GEE, es analizar el comportamiento del usuario a partir de comportamientos y conocimientos previos al uso de la vivienda bioclimática, de modo que puedan hacerse estimaciones sobre la evolución de su actitud y hábitos a partir de información específica. Este análisis se apoya tanto en su proceso de encuesta como en un seguimiento generalizado del comportamiento de los edificios (se monitorizan unas 190 viviendas representativas, a su vez, de unas 2800 dentro del total de 9500 de la urbanización completa)

análisis cabe destacar los resultados obtenidos por Lomas K.J. et al (1997). En este trabajo se compararon 25 programas con los cuales se modelaron tres células de tests que estaban monitorizadas con el objetivo de comparar los diferentes resultados que reproducían las aplicaciones informáticas con el comportamiento real de las células.

Para analizar las 25 aplicaciones se definieron 14 parámetros (temperaturas, demandas, etc) de los cuales se obtuvieron los valores medios y los rangos de variación entre los diferentes programas (banda de error). TSBI3 era la aplicación para la que más parámetros de la evaluación caían dentro de la banda de errores y además era la única que predecía siempre los valores máximos y mínimos de temperaturas interiores y la demanda de calefacción dentro de la banda de error.

En la tabla 3.2 se listan los diferentes programas analizados por Lomas K.J. et al (1997) así como las instituciones que realizaron los modelos de las células test.

Programa	Versión	País de origen	Institución
Apache	6.5.2	Inglaterra	Facet Ltd. UK
Blast	3lv1143	Estados Unidos	Colorado State University (CSA)
Blast	4.01vl1203	Estados Unidos	Politecnico di Torino, Italia
Cheetah	1.2	Australia	CSIRO
Clim2000	1.1	Francia	Electricité de France (EDF)
Derob	Lth	Estados Unidos	Lund Institute of Technology (Suecia)
Doe	2.1E	Estados Unidos	Lawrence Berkeley Laboratory (LBL)
Energy2	1.0	Inglaterra	Arup R&D
Esp	6.18 a	Inglaterra	De Monfort University (DMU); Leicester
Esp-r	7.7 a	Inglaterra	Energy Simulation Research Unit, Univer. de Strathclyde
Esp+	2.1	Inglaterra	DMU Leicester / ASL Sterling
Htb2	1.2	Inglaterra	Fachhochschule für Tecnik, Stuttgart (Alemania)
Htb2	1.10	Inglaterra	University of Wales College of Cardiff
Seri-res	1.2	Estados Unidos	Building Research Establishment (BRE)
Suncode	5.7	Estados Unidos	Ecotope
S3pas	2.0	España	Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla
Tase	4.0	Finlandia	Tampere University of Technology
Tas	7.54	Inglaterra	DMU Leicester / Environment Design Solutions Ltd
Trnsys	14.1	Estados Unidos	University of Wisconsin, Madison
Trnsys	12	Estados Unidos	BRE
Trnsys	13	Estados Unidos	BRE
Trnsys	14.1	Estados Unidos	Vrije Universiteit Brussel (Bélgica)
TSBI3	2.0	Dinamarca	Danish Building Research Institute (SBI)
Wg6tc	1992	Italia	Institute di Fisica Technica, Udine
3tc	1.0	Inglaterra	Face Ltd.

Tabla 3.2. Aplicaciones de simulación comparadas por IEA. (Fuente: Lomas K.J. et al, 1997).

El trabajo realizado por Lomas ha supuesto los siguientes beneficios:

- Permitir contrastar los resultados de nuevas aplicaciones con alguna de las analizadas por la IEA siendo más fiable la validez si se eligen como programas tests los que más precisión hayan demostrado.
- Informar a nuevos usuarios sobre la precisión de las aplicaciones a la hora de comprar o utilizar alguna de ellas.

3.3. Datos climáticos utilizados en simulación energética de edificios

Uno de los datos principales a introducir en los métodos de cálculo simplificado de edificios corresponde a los valores medios mensuales de temperatura exterior y de radiación solar global sobre horizontal mientras que en los detallados se utilizan datos horarios climáticos de:

- temperatura exterior,
- dos parámetros independientes de radiación. Habitualmente se utilizan la radiación global y la difusa para superficie horizontal,
- humedad relativa,
- y velocidad del viento.

En los dos siguientes subapartados se van a mostrar las características que deben tener los datos climáticos medios mensuales y horarios utilizados en métodos simplificados y detallados, incluyendo cómo se generan los climas tipos que representan la climatología de la localización en la que se ubicará el edificio objeto de análisis.

En el apartado de validación, que se verá más adelante en este capítulo, se utiliza la metodología de generación de climas horarios sintéticos que se expone en el apartado 3.3.2.1 de climas en métodos detallados, sin la cual no se podría realizar la validación del método de cálculo propuesto en la tesis para el balance energético de edificios, dado que para España todavía no se pueden generar climas horarios con datos reales⁴ por contar con pocos años de registros meteorológicos con esta característica.

Aunque se proponga un método simplificado, en el que bastaría un clima medio mensual para el cálculo de la demanda del edificio, se deberá recurrir a la generación horaria de la radiación solar para tener en cuenta el sombreado entre edificios de la urbanización. Mostrándose nuevamente la importancia que tiene en esta tesis la generación de un modelo de radiación horaria como el enunciado en el apartado 3.3.2.1.

3.3.1. Datos climáticos en métodos simplificados

Para los métodos simplificados se necesitan los valores medios mensuales de temperatura y de radiación global sobre superficie horizontal o en su defecto de insolación (Bernad R., et al. 1982). Estos datos climáticos se facilitan en los diversos centros de los que dispone el Instituto Nacional

⁴ Una excepción es el reciente cálculo del TRY para la ciudad de Zaragoza publicado en *Energía Solar y Datos Climáticos en Aragón*, GEE, 2008. En él se utilizan datos horarios reales con pequeños huecos en las series de temperatura, humedad relativa, radiación global sobre horizontal y velocidad del viento.

Meteorológico⁵ (<http://www.inm.es/>) o en las Comunidades Autónomas, por ejemplo, el Gobierno de Navarra posee desde 1992 una red propia de estaciones automáticas.

A partir del dato medio mensual de radiación global sobre superficie horizontal con los modelos matemáticos adecuados (Hernández M.A. et al, 2005), se puede conocer la radiación solar directa y difusa sobre cualquier superficie con orientación e inclinación cualesquiera.

Para obtener los valores medios mensuales se debe partir de una serie de datos climáticos de 10, 15 o 30 años. Cuantos más años se utilicen más representativo es el valor medio climático para obtener la demanda media anual. En principio, desde un punto de vista estadístico cuantos más años tenga la serie temporal mayor será la aproximación a la demanda media anual de energía de un edificio y mejor quedará acotada la franja de variabilidad. No debemos ignorar que los valores de cada año entrarán dentro de esta franja dando una desviación respecto del valor simulado, como se ha indicado antes.

El valor medio mensual representativo del clima analizado es la media de los valores medios de cada mes del período considerado. Con estos valores se podrá realizar el balance energético con los modelos simplificados obteniéndose la demanda media mensual de calefacción o de refrigeración.

En algunos análisis simplificados se utiliza el concepto de grados día obtenido al operar matemáticamente con los valores medios mensuales y una temperatura base. La determinación de los grados día se expone en el apartado D.1 de los métodos de análisis simplificados (Anexo D).

3.3.2. Datos climáticos en métodos detallados. Ficheros TRY

En el caso de métodos de cálculo detallados se necesitan valores medios horarios de temperatura seca, humedad, velocidad del viento, radiación sobre superficie horizontal global y difusa (o dos valores independientes) de un año completo o de un período (semana o mes).

Habitualmente estos datos no suelen estar disponibles en España ya que los observatorios meteorológicos nacionales no han realizado estas mediciones o existen datos de pocos años.

El conjunto de datos horarios debe ser representativo del clima analizado (Miguel de A. et al, 2005). Estos datos reciben diferentes nombres; en Estados Unidos a esta agrupación se llama TMY (Typical Meteorological Years) mientras que en Europa se conoce como TRY (Test Reference Years) y en el caso de contener datos de un período inferior al año se denomina SRY (Short Reference Years).

La representación climática a través de un TRY tiene validez sólo para un área geográfica limitada (Lund H. 1985) y es usada por métodos detallados horarios para:

- obtener las cargas de demanda o aportes y los valores medios de temperaturas en las diversas zonas que componen un edificio, así como perfiles horarios de temperatura en los diferentes habitáculos considerados;

⁵ A raíz del Real Decreto 186/2008 se ha creado la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Esta nueva Agencia Estatal asume todas las competencias y funciones del Instituto Nacional de Meteorología (INM) siendo su página en la red <http://www.aemet.es/es/nuevaweb> que sustituye a la mencionada aquí.

- comparar alternativas constructivas en la fase de prediseño teniendo en cuenta la transferencia dinámica en los cerramientos del edificio y el control de los sistemas auxiliares de forma horaria.

Lund H. (1985) referencia que el uso de datos meteorológicos horarios es el único camino para poder construir la serie de datos que conformará el año patrón. El conjunto de datos del año climático que se genera a partir de la serie de años debe cumplir las siguientes características:

1. Frecuencia verdadera: Los datos deben ser tan cercanos como sea posible al valor medio de un período largo. Por ejemplo, un mes; también deben presentar una distribución natural de valores mayores y menores para los días que componen el mes;
2. Secuencia verdadera: Los datos deben almacenarse correlativamente según su orden de ocurrencia temporal;
3. Verdadera correlación entre diferentes parámetros (temperatura, radiación solar, grado de cobertura del cielo, viento, etc).

Aunque los requerimientos del punto primero se pueden cumplir para la generación de un año medio estadístico, los apartados segundo y tercero no serían satisfechos ya que algunas de las relaciones entre parámetros climáticos no pueden ser representadas de forma matemática.

Anteriormente se ha comentado que se debe partir de datos reales meteorológicos, sin embargo existe la posibilidad de generar los TRY desde valores medios mensuales. Lund H. (1985) referencia alguno de los métodos que se pueden utilizar para construir el año tipo. Éstos son los trabajos realizados por Liem S.H. (1984) y Mustachi C. (1984).

A este año tipo se le puede denominar ‘sintético’ (Gansler R. A. et al, 1994) ya que es una serie construida de forma artificial.

Los datos generados a partir de los datos medios climáticos podrán satisfacer los dos primeros puntos, pero sin embargo el tercero no se cumplirá. Por este incumplimiento es por el que se hace necesario el uso de datos climáticos reales.

La justificación del cumplimiento de los tres condicionantes es debida a la naturaleza del tipo de uso de estos TRY. Éstos se utilizan para el análisis de edificios o sistemas solares que poseen características de inercia debiendo verificarse las frecuencias y secuencias reales de los parámetros climáticos para someterlos a condiciones reales climáticas que incluyan valores extremos y no medias de valores extremos.

Además estos sistemas presentan no linealidades, las cuales prohíben el uso de la superposición en los cálculos necesitándose por este motivo el uso de frecuencias y correlaciones verdaderas (apartados primero y tercero).

En el caso de la radiación solar se necesitan dos datos independientes. Habitualmente se conoce la radiación global horaria sobre horizontal, pero no se suele medir la radiación directa o la difusa. En este caso se debe recurrir a la aplicación de correlaciones apropiadas (Iqbal M. 1983) a partir del dato medido, que es la radiación global.

En los subapartados siguientes se describe cómo obtener un TRY a partir de datos climáticos medios mensuales y mediante series anuales de datos horarios.

3.3.2.1. *Ficheros TRY basados en datos medios mensuales*

En el caso de no disponer de datos horarios se podrá construir un TRY a partir de datos medios mensuales, Bahadori M.N. (1986) propuso un método para su generación que se basaba en:

- temperaturas mensuales medias de las máximas y de las mínimas,
- radiación global sobre horizontal o el índice de nubosidad Kt (Turégano J.A. et al, 1995)

A partir de estos datos se obtiene la evolución horaria de la temperatura seca y de la radiación global de un día tipo del mes. Basta con repetir este día para todos los días del mes y unir los diferentes meses así construidos para generar el año tipo TRY.

Para comprobar la validez de este método Bahadori M.N. et al (1986) compararon los resultados de la demanda de calefacción y de refrigeración de un edificio de referencia situado en Ottawa (Canadá) utilizando los diferentes datos climáticos que a continuación se detallarán.

A este edificio inicial le realizó dos variaciones constructivas, obteniéndose tres resultados de la demanda energética con los cuales demostraba la valía de la construcción del TRY a partir de datos medios mensuales cuando se carece de datos horarios.

Los datos climáticos que utilizó en los balances energéticos para calefacción y refrigeración fueron:

- Simulación de 10 años (1967-76) de datos horarios obteniendo la demanda mensual para todos los años. El valor medio mensual para todos los años lo llamó TYA.
- Demanda mensual con el año climático TMY existente en Ottawa.
- Dos métodos llamados T1 y T2 basados en valores medios mensuales climáticos con el que se construyó un fichero sintético TRY.

Para el edificio de referencia situado en Ottawa usado por Bahadori M.N., las diferencias de la demanda anual de calefacción y de refrigeración obtenidas para los diferentes datos climáticos (10 años, TMY, T1 y T2) es pequeña como muestra la tabla 3.3.

En el gráfico 3.1, se aprecia cómo las necesidades mensuales predecidas para los diferentes ficheros climáticos son bastante aproximadas.

Bahadori M.N. pone de manifiesto la existencia de resultados no aproximados cuando se analizan períodos diarios ya que los días pertenecientes al TYA y al TMY son valores reales climáticos y no valores medios. En la figura 3.2 se puede comprobar la diferencia de las cargas de calefacción y de refrigeración para un día de enero y otro de julio utilizando los datos TMY, T1 y T2.

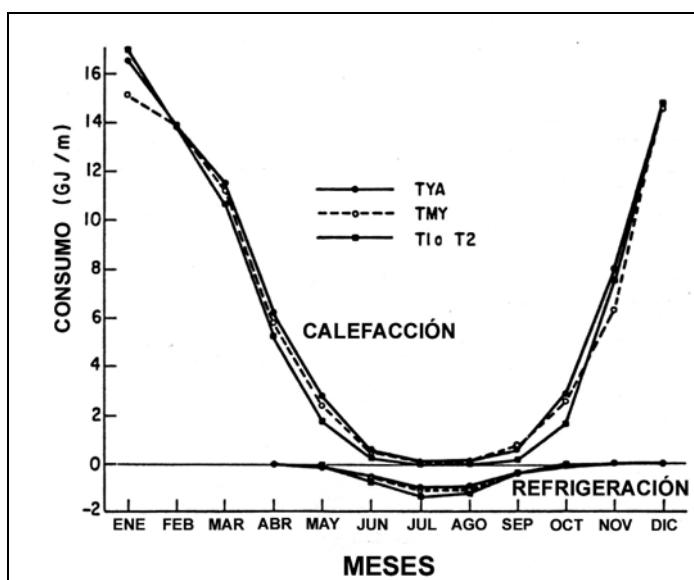


Figura 3.1. Demandas de calefacción y refrigeración mensuales del edificio de referencia de Bahadori M.N et al (1986) obtenidas para diferentes ficheros horarios climáticos. (Fuente: Bahadori M.N et al, 1986).

Método	Demandা calefacción (GJ/año)	Demandা cale- facción (variación %)	Demandা refri- geración (GJ/año)	Demandা re- frigeración (variación %)
TYA	77.65	0	4.48	0
TMY	74.21	4.4	4.85	8.3
T1	72.93	6.1	4.75	6.0
T2	74.00	4.7	4.99	11.4

Tabla 3.3. Demandas de calefacción y refrigeración obtenidas para diferentes fuentes de datos climáticos TRY. (Fuente: Bahadori M.N et al, 1986)

De modo similar Cannistraro G. et al (1995), realizaron un estudio comparativo extendiéndolo a 29 poblaciones europeas simulando un modelo de referencia con la aplicación de cálculo horario SUNCODE, empleando los TRY de las poblaciones y otro sintético desarrollado por Erbs D. et al (1983) y referenciado por Cannistraro.

Las 29 poblaciones analizadas son las que aparecen en la figura 3.3 y de las que existen ficheros TRY desarrollados por la Commission of the European Communities (Lund H., 1985). Éstos fueron construidos a partir de los datos climáticos de los diversos institutos meteorológicos.

Los resultados obtenidos por Cannistraro G. vuelven a revelar la validez de los datos sintéticos en el análisis energético de edificios. Tomando como referencia la demanda proporcionada por SUNCODE con los ficheros TRY para todas las poblaciones, la mayor desviación respecto a los ficheros sintéticos era inferior a un 5% disminuyendo este valor al aumentar la latitud de la población, que corresponde a climas más fríos. En la figura 3.4 se puede observar esta tendencia mientras que en la figura 3.5 se representan los valores de demanda obtenidos por los TRY y por los sintéticos verificándose la escasa dispersión de resultados.

Esta baja dispersión corresponde a los valores acumulados de demanda de calefacción y refrigeración anuales como señala la figura 3.4, sin embargo como refleja la figura 3.2 los resultados de la demanda instantánea pueden diferir sensiblemente (hasta el 30% en un momento dado) en valor relativo (errores relativos altos) pero no existen grandes diferencias en error absoluto de demanda anual.

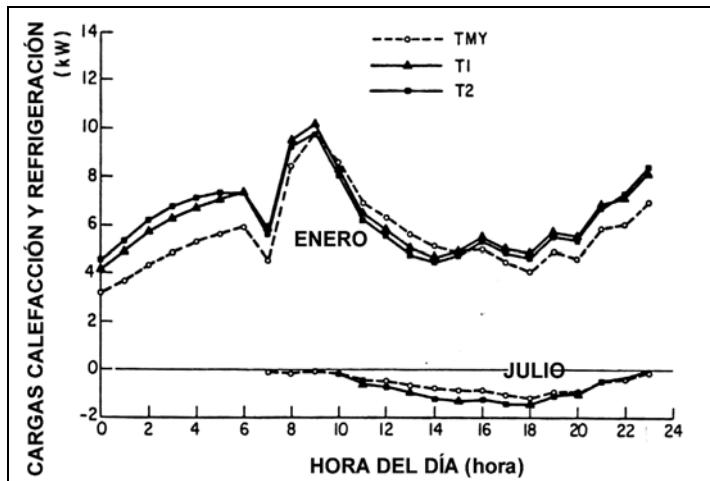


Figura 3.2. Cargas de calefacción y refrigeración para dos días seleccionados del edificio de referencia de Bahadori M.N et al (1986) utilizando los datos climáticos TMY, T1 y T2. (Fuente: Bahadori M.N et al, 1986).

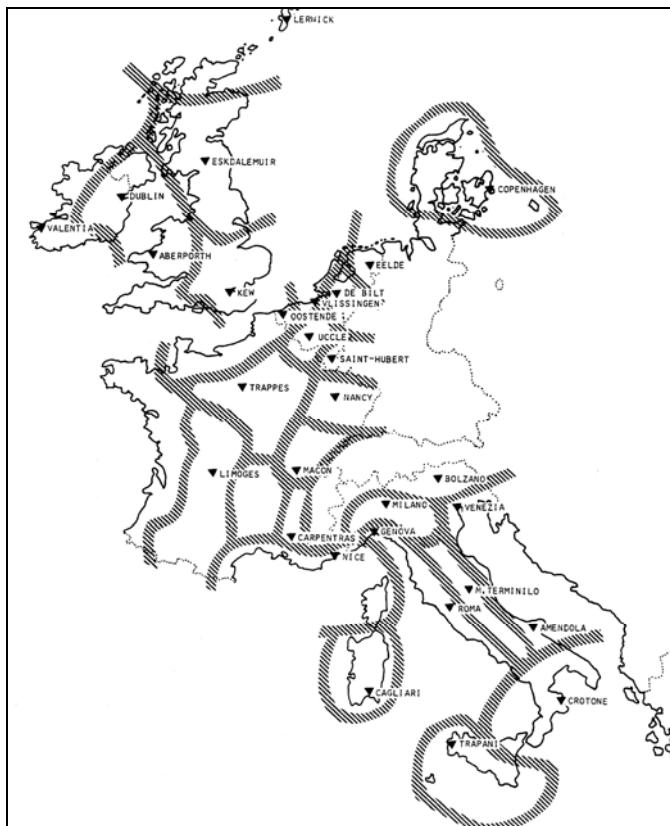


Figura 3.3. Ciudades europeas analizadas por Lund H. (1985) de las cuales existen ficheros TRY construidos a partir de datos climáticos. (Fuente: Lund H., 1985).

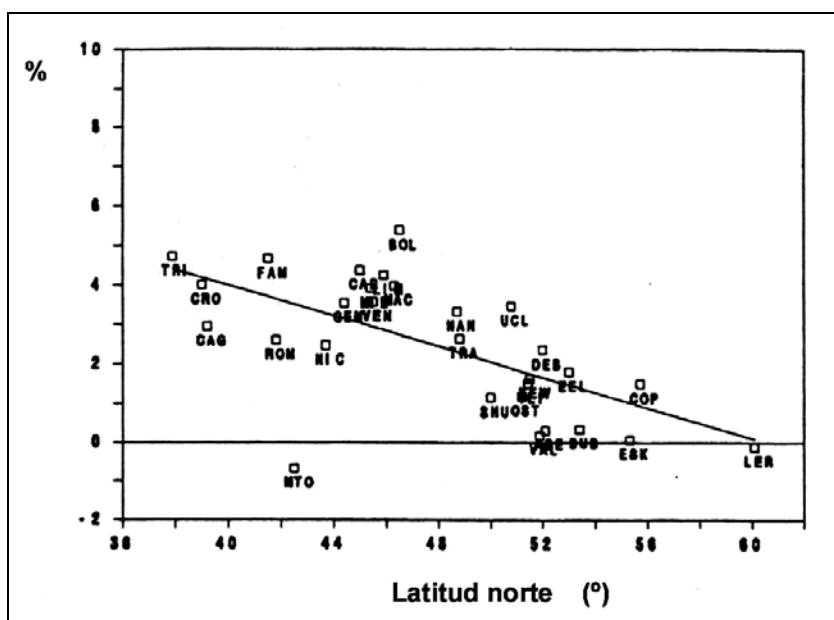


Figura 3.4. Variaciones en % de la demanda obtenida para el edificio de referencia localizado en 29 poblaciones diferentes tomando como base las demandas obtenidas con ficheros TRY frente a los ficheros sintéticos. (Fuente: Cannistraro G et al, 1995).

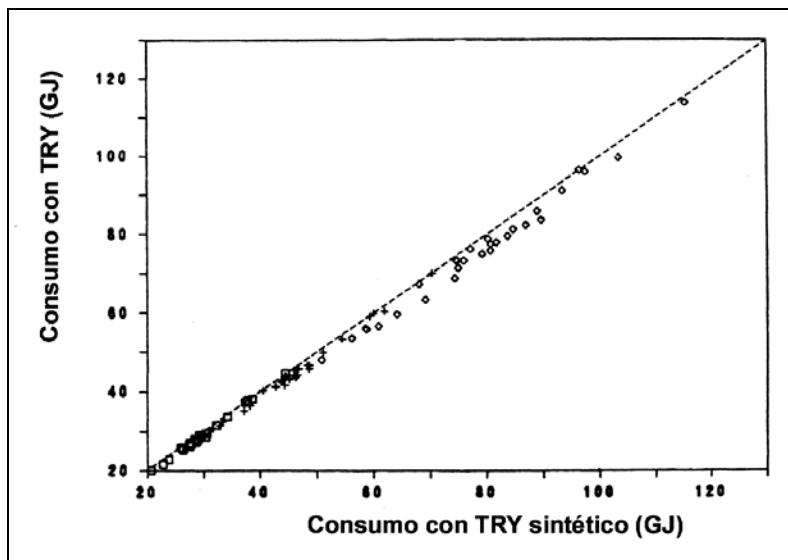


Figura 3.5. Representación de la demanda con ficheros TRY y con TRY sintéticos para el edificio de referencia localizado en 29 poblaciones europeas. (Fuente: Cannistraro G et al, 1995).

En el caso de no tener valores climáticos horarios, situación habitual en España, se podrá utilizar el método que se detalla a continuación de Bahadori M.N. et al (1986).

Para el día medio de cada mes, la temperatura horaria exterior ($T(h)$) se obtendrá con la ecuación:

$$T(h) = T' + \frac{1}{2} \times A_i \times \cos(15 \times (h - 15)) \quad [3.5]$$

h : hora del día analizada, (1 a 24 horas).

$$T' = \frac{1}{2} \times (T_{max} + T_{min}) \quad [3.6]$$

$$A_t = (T_{max} - T_{min}) \quad [3.7]$$

T_{max} : temperatura media máxima del mes analizado, ($^{\circ}\text{C}$).

T_{min} : temperatura media mínima del mes analizado, ($^{\circ}\text{C}$).

Por ejemplo en la figura 3.6 se muestra el aspecto de las curvas generadas de temperaturas horarias con el método anterior para la localidad de Soria. Se ha partido de los datos medios mensuales ofrecidos por el Instituto Nacional de Meteorología (INM) para esta población.

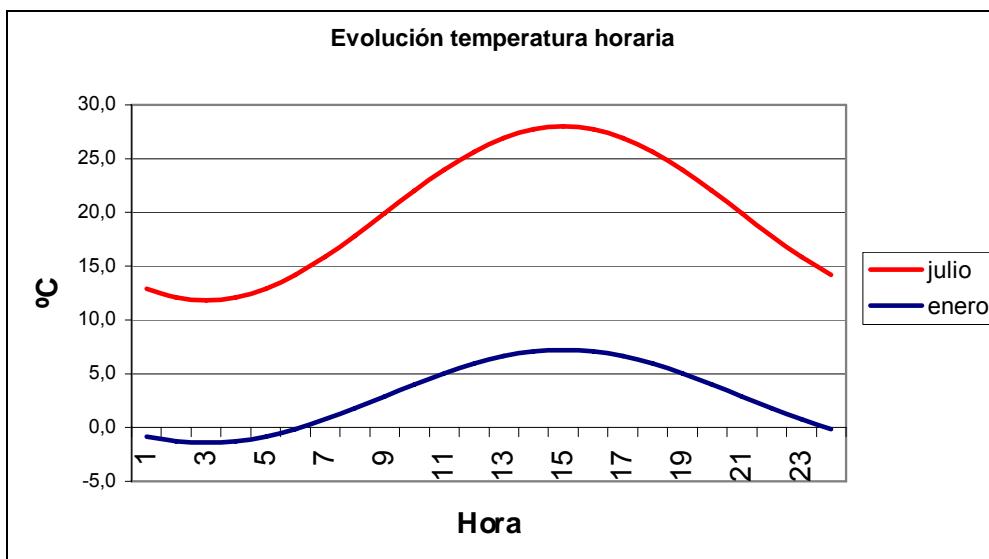


Figura 3.6. Temperatura horaria para día medio de enero y julio en Soria partiendo de los datos medios del INM aplicando el método propuesto por Bahadori M.N et al (1986).

Para obtener la irradiación global horaria sobre horizontal ($I_G(h)$, Wh/m^2) se parte del índice de nubosidad medio mensual (Kt) y de la irradiación global extraterrestre sobre superficie horizontal (I_{GO}).

$$I_G(h) = k \times I_{GO} \quad [3.8]$$

h : hora del día analizada, (1 a 24 horas).

$$I_{GO} = 1353 \times \left[1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{360 \times N}{365}\right) \right] \times \cos \theta_z \quad (\text{Wh}/\text{m}^2) \quad [3.9]$$

N : número del día medio del mes analizado, ($N=1$ corresponde al día 1 de enero).

θ_z : ángulo cenital ($^{\circ}$) del día 15 del mes analizado,

$$\cos \theta_z = \sin(\delta) \times \sin(L) + \cos(\delta) \times \cos(L) \times \cos(w) \quad [3.10]$$

L : latitud del lugar, ($^{\circ}$).

δ : declinación solar ($^{\circ}$) del día del mes analizado. Se expone su determinación en Hernández M.A. (2005).

w : ángulo horario ($^{\circ}$). Su cálculo viene expresado en Hernández M.A. (2005).

$$k = [a + b \times \cos(15 \times (h - 12))] \times K_t \quad [3.11]$$

$$K_t = \frac{H_G}{H_{GO}} \quad [3.12]$$

H_G : radiación global media diaria sobre horizontal del mes analizado, (Wh/m^2 día). Este valor se debe obtener de datos meteorológicos del lugar analizado.

H_{GO} : radiación global media diaria horizontal del mes analizado para día claro, (kWh/m^2 día). Su cálculo debe evaluarse para el día del mes enunciado en la tabla 3.4. (Mitjà A. et al 1982).

$$H_{GO} = \frac{24}{\pi} \times 1353 \times \left[1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{360 \times N}{365}\right) \right] \times \\ \times \left[\cos(L) \times \cos(\delta) \times \sin(w_s) + \frac{2\pi}{360} \times w_s \times \sin(L) \times \sin(\delta) \right] \quad [3.13]$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \times \sin(w_s - 60) \quad [3.14]$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \times \sin(w_s - 60) \quad [3.15]$$

w_s : ángulo horario de salida o puesta del sol ($^{\circ}$).

$$w_s = ar \cos(-tag L \times tag \delta) \quad [3.16]$$

Mes	Nº día 'N'
Enero	17
Febrero	47
Marzo	75
Abril	105
Mayo	135
Junio	162
Julio	198
Agosto	228
Septiembre	258
Octubre	288
Noviembre	318
Diciembre	344

Tabla 3.4. Días para los que debe evaluarse el cálculo de la radiación global diaria sobre superficie horizontal para día claro. (Fuente: Mitjà A. et al 1982).

En los métodos detallados no basta con introducir la radiación global horaria sobre la horizontal, hace falta otro parámetro independiente, por ejemplo, la radiación difusa horaria sobre la horizontal ($I_d(h)$) (Iqbal M., 1983).

$$\frac{I_d(h)}{I_G(h)} = 1 - 0.249 \times k \quad \text{Para } k < 0.35 \quad [3.17]$$

$$\frac{I_d(h)}{I_G(h)} = 1.557 - 1.84 \times k \quad \text{Para } 0.35 < k < 0.75 \quad [3.18]$$

$$\frac{I_d(h)}{I_G(h)} = 0.177 \quad \text{Para } 0.75 < k \quad [3.19]$$

En la figura 3.7 se muestra el aspecto de las curvas generadas de radiación global y difusa horarias sobre la horizontal para los meses de enero y julio a partir de la radiación global media sobre la horizontal para el caso de Zaragoza. Los datos de radicación provienen de Turégano J. et al (1994).

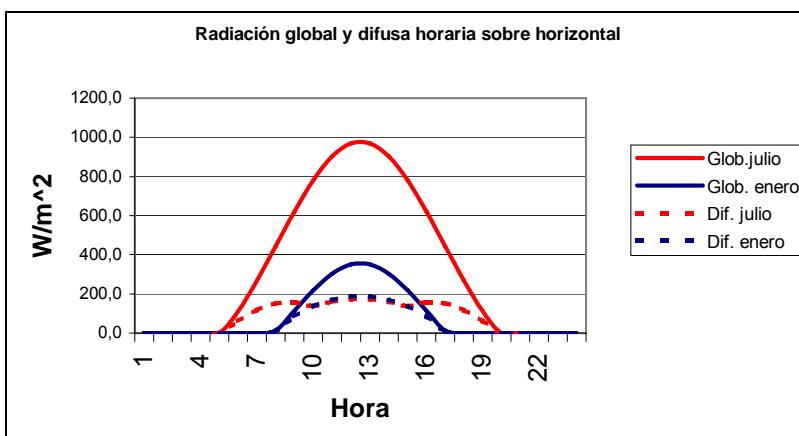


Figura 3.7. Radiación global y difusa horaria sobre horizontal para un día medio de enero y julio de Zaragoza partiendo de los datos medios de Turégano J. A. et al, 1994.

Partiendo de los trabajos de Liu B.Y.H. et al (1960) en los que se planteaba la relación entre la radiación horaria y la radiación media mensual sobre superficie horizontal, Whillier A. (1965) obtuvo gráficamente la relación entre la radiación difusa y global horarias respecto a la radiación global media. Tal y como referencia Iqbal M. (1983), posteriormente Collares-Pereira et al (1979) obtuvieron las relaciones matemáticas de los gráficos de Whillier A. (1965).

Los resultados gráficos referenciados por Iqbal M. (1983) y obtenidos por Whiller A. (1965) se muestran en las figuras 3.8 y 3.9, estos valores se obtienen si se aplican las ecuaciones planteadas por Bahadori M.N. para la radiación solar.

Gansler R.A. et al (1994), realizaron una comparación para la localidad de Madison (Estados Unidos) entre las correlaciones de Collares-Pereira, los datos de radiación del TRY de Madison y un TRY sintético. En la figura 3.10 se muestra cómo el modelo sintético de radiación construido según las correlaciones de Collares-Pereira tiene valores muy próximos al obtenido con el TRY de la población.

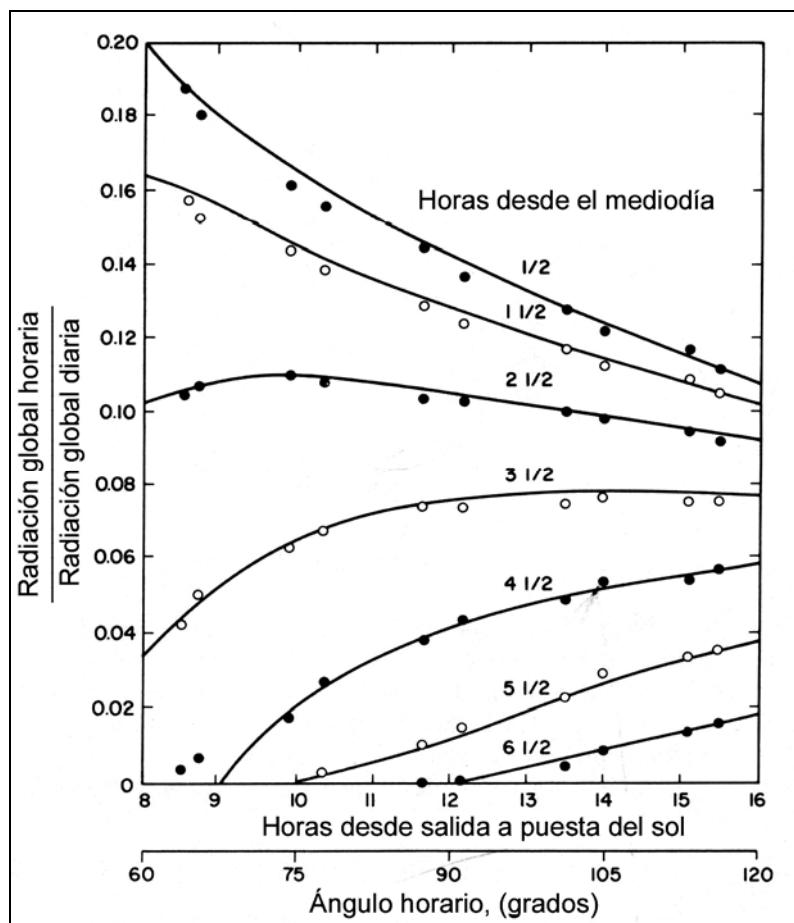


Figura 3.8. Relación entre la radiación global media horaria respecto a la radiación global media mensual sobre superficie horizontal. (Fuente: Iqbal M. 1983).

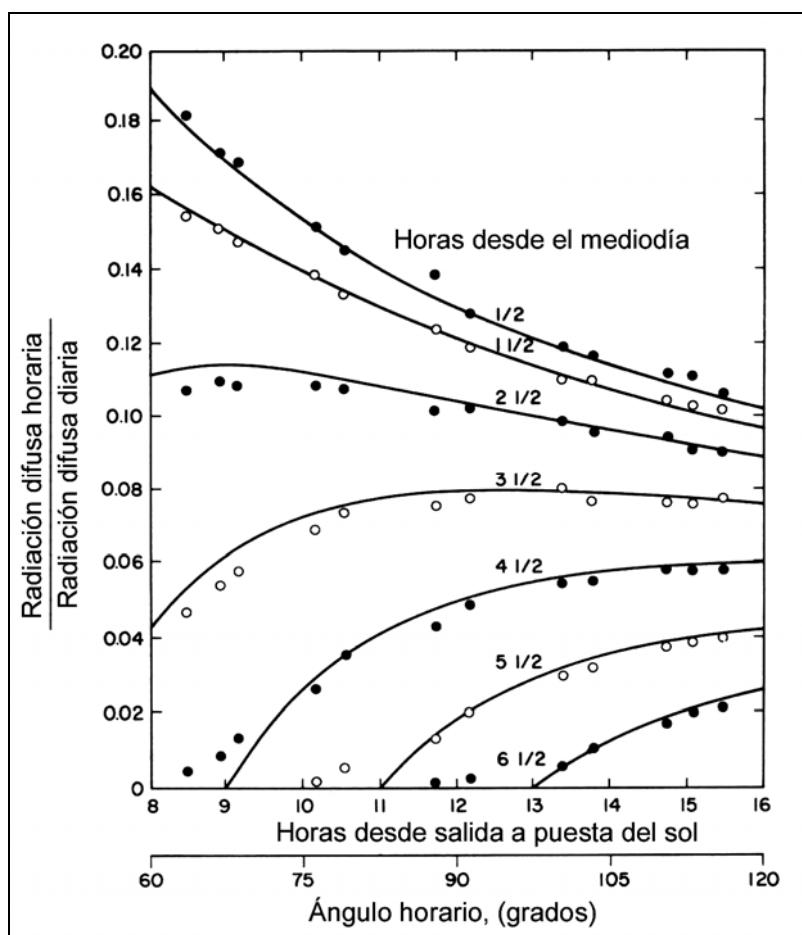


Figura 3.9. Relación entre la radiación difusa media horaria respecto a la radiación difusa media mensual sobre superficie horizontal. (Fuente: Iqbal M. 1983).

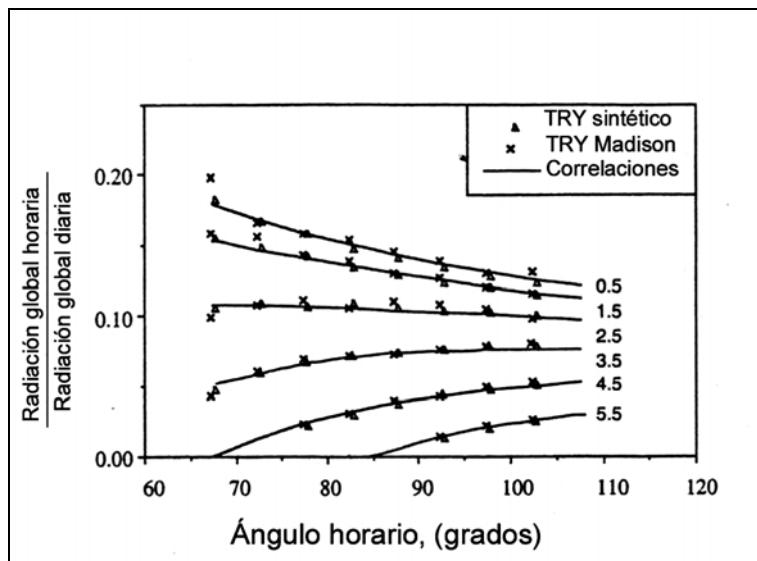


Figura 3.10. Comparación de la radiación global horaria frente a la radiación global media mensual para Madison según las correlaciones de Collares-Pereira, TRY y un TRY sintético. (Fuente: Gansler R.A. et al 1994).

3.3.2.2. *Ficheros TRY basados en datos horarios climáticos*

Aunque el modelo propuesto en la tesis es un método simplificado, su validez se contrasta, como se ha indicado antes, con los resultados obtenidos para diversos edificios y climas con un método dinámico y éste precisa de datos horarios de varias magnitudes climáticas que no queden enmascarados por medias estadísticas. Este requisito se cubre con los ficheros TRY.

Partiendo de una serie de datos climáticos horarios como mínimo de 25 años (Miguel de A. et al, 2005), se puede construir el año climático TRY. Por ejemplo, en el caso de contar con datos de 1980 a 2005, el mes de enero más apropiado puede ser el del año 1993 y febrero podría ser el de 1982 en el supuesto de que estos resultados fuesen los más representativos del clima analizado.

Un TRY construido de este modo no tiene por qué tener continuidad entre los datos finales de un mes y el comienzo del siguiente. Este inconveniente se salva sustituyendo los valores reales tres horas antes y tres después del final del mes por una interpolación lineal entre éstos de tal modo que se produce la continuidad (Argiriou A. et al 1999).

El método de selección para la construcción del TRY ha ido variando con la utilización de herramientas informáticas. Así, en un principio se elegían días tipos meteorológicos en los que el parámetro importante era la radiación global horizontal (Feuermann J.M. et al 1985). Los TRY pasaron a utilizarse para la predicción del confort térmico de edificios, la determinación de las cargas horarias de calefacción y refrigeración. También se comenzó a utilizar en el análisis de sistemas solares fotovoltaicos y térmicos para la preparación de ACS.

En el balance energético que rige el comportamiento de los anteriores sistemas se necesitan los datos climáticos horarios (TRY). En estos casos no basta sólo con la temperatura y la radiación global, también hace falta la radiación difusa, la humedad relativa y la velocidad del viento entre otros parámetros.

Para seleccionar los meses que definirán el fichero TRY se puede utilizar el método de los pesos ponderados (Pissimanis D. et al 1988, Marion W. et al 1995 y Bahadori M.N. et al 1986). Éstos se basan en asignar diferente importancia a los parámetros climáticos, en el Anexo E se recoge una selección de los diferentes métodos que se pueden utilizar para generar un TRY a partir de datos climáticos reales horarios de la localización analizada.

3.3.2.3. *TRY sintéticos o reales en la modelación*

Cuando se quiere realizar una correcta simulación detallada del comportamiento de un edificio es mejor utilizar un TRY real, construido con datos horarios climáticos medidos, obteniéndose una mejor aproximación horaria de las temperaturas y demandas reales que tendrá el edificio al componerse la inercia del edificio con las variaciones climáticas que suceden a lo largo de los días.

Para la construcción del TRY real se seguirán las indicaciones del apartado anterior, en el que se pone de manifiesto la principal dificultad de su generación, que no radica en la dificultad del método sino en la escasez de datos meteorológicos horarios en España o el reciente comienzo de los registros.

Ante esta dificultad insalvable, para multitud de poblaciones españolas, toma su importancia la generación sintética, siendo el clima que habitualmente se podrá generar para alimentar las herramientas de simulación dinámica.

Los resultados de temperatura interiores o demandas horarias obtenidas si se utiliza un TRY sintético no tendrán gran valor, dado que el clima al que se somete el edificio es artificial y la metodología de creación de valores horarios basada en curvas teóricas a partir de los valores medios anula, precisamente, las variaciones extremas del clima real que son las más significativas a la hora de calcular sobrecalentamientos o subenfriamientos como se ha señalado antes.

Pero sin embargo ha quedado patente en los apartados anteriores que las demandas en la escala anual de calefacción o refrigeración son similares al utilizar un TRY sintético o uno real, existiendo diferencias acotadas cercanas al 5% como máximo como demuestran los trabajos de Cannistraro G. et al (1995).

Una mala caracterización climática de un lugar con una serie de datos horarios de pocos años para una localización puede llegar a conducir a mayores errores que la decisión de utilizar un TRY sintético. Se verá más adelante cómo una estimación inadecuada de temperatura correspondiente a una desviación de pérdidas de un 10% puede dar lugar a errores de la demanda cercanos al 30%, mientras que una variación del 10% en la estimación de la radiación global sobre horizontal puede dar lugar a desviaciones de la demanda del 10%. Estas diferencias son superiores a las que se pueden tener al utilizar un TRY sintético frente a uno real.

Por lo tanto los TRY sintéticos diferirán poco de los TRY reales en cuanto a la determinación de necesidades, como sucede con los métodos simplificados de balance energético de edificios frente a los dinámicos. En cuanto a la ventaja de la simulación horaria queda reducida por el carácter estimado de los valores climáticos horarios y que pueden conducir a hipótesis incorrectas.

3.3.2.4. *La función de los TRY sintéticos en el análisis urbanístico*

La evaluación de diversas disposiciones urbanísticas como solución de un proyecto urbanístico puede realizarse, según recoge lo anterior, con un balance estático basado en valores medios, sin necesitar la complejidad de cálculo de un simulador dinámico.

Y esto no sólo por la falta de TRY reales para casi todas las localidades del país sino porque el óptimo del diseño es un mínimo cuya definición no depende⁶ de la mayor o menor precisión que ofrece la caracterización climática, existiendo dispersiones de la demanda energética del edificio de un 5% como máximo entre utilizar TRY reales o sintéticos, como se muestra en el apartado 3.5.4. Este mínimo tiene su plena significación en el análisis específico de cada edificio y será en este nivel, tercer nivel del análisis, donde sí será relevante el uso de TRYs reales si queremos evaluar sobrecalentamientos, por ejemplo.

3.4. Parámetros necesarios para realizar el balance energético

En este apartado se realiza una revisión de los parámetros necesarios en el balance energético de edificios por los métodos seleccionados del Anexo D y que se muestran en las tablas 3.5 y 3.6.

Estos parámetros son los datos generales que aparecen en las ecuaciones que rigen los balances de energía. En la tabla 3.6 se han agrupado los correspondientes a los diversos métodos simplificados planteados en el capítulo y en el Anexo D.

⁶ Sí lo hará el valor obtenido para la demanda, sea el mínimo absoluto o un mínimo relativo condicionado por las restricciones que se planteen en el análisis de cada caso (por ej.: viales preexistentes que limiten el grado de libertad de la orientación).

Como recoge la norma UNE-EN 832 (2000), no deben existir grandes diferencias entre diversas aplicaciones si los modelos son equivalentes, es decir, idénticos cerramientos, ganancias internas, factores climáticos, etc. Estas diferencias pueden ser similares⁷ a las que se tendrían si dos personas desarrollan el mismo modelo para un edificio (forma, estructura, cerramientos, clima, ...) con el mismo método.

En cuanto a los métodos detallados o dinámicos se ha utilizado el implementado por la aplicación TSBI3 v22⁸ (1997), que como se ha señalado anteriormente en el apartado 3.2 es una de las más precisas.

De la revisión de ambas tablas se comprueba cómo los métodos detallados o dinámicos son más complejos, necesitando mayor cantidad de parámetros y por lo tanto mayor grado de información del edificio en la fase de prediseño.

Por ejemplo, para definir la conducción de un cerramiento en un método detallado hay que introducir la absorbancia de su superficie exterior, la densidad, la conductividad y el calor específico de cada capa que lo conforma, no siendo equivalente introducir tan sólo la conducción total del cerramiento, hipótesis ésta con la cual se reduce el esfuerzo de modelación de los métodos simplificados.

El ‘método propuesto’ en urbanismo deberá ser del tipo simplificado al poder contar con poca información en la fase de prediseño de la urbanización, pero éste no podrá perder precisión.

Método detallado TSBI3 (cálculo calefacción + refrigeración)

Clasificación	Datos necesarios para el BE
Parámetros climáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Fichero TRY con los siguientes datos: <ul style="list-style-type: none"> – Temperatura exterior, humedad relativa, radiación directa en dirección normal, radiación difusa sobre superficie horizontal, grado de cobertura de cielo y velocidad media del viento
Cerramientos	<ul style="list-style-type: none"> • A: área cerramientos • U: conductancia cerramientos • Absorbancia de los cerramientos • Densidad de los materiales utilizados en los cerramientos • Calor específico de los materiales del cerramiento y posición de las diferentes capas
Renovación aire	<ul style="list-style-type: none"> • n: coeficiente renovación aire (interior – exterior y entre diferentes zonas), variable en función de la velocidad del viento y la diferencia de temperatura entre exterior e interior • V: volumen climatizado
Ganancias solares	<ul style="list-style-type: none"> • Transmitancia directa y difusa de los acristalamientos • Distribución interior de la captación solar asignada a suelo, paredes y techo
Ganancias internas	<ul style="list-style-type: none"> • Ganancia ocupacional y de los diferentes sistemas que generan calor en el interior de las zonas • Programación horaria de los sistemas interiores

Tabla 3.5. Resumen de datos necesarios para realizar el balance energético (BE) de edificios según el método detallado de cálculo horario implementado en la aplicación informática TSBI3 (1997).

⁷ Diferencias que, por ejemplo, en el caso del programa Lider con algunos casos analizados han alcanzado valores del 25% de dispersión entre dos usuarios que introducen el mismo edificio. Hay que hacer constar que se permite validar programas alternativos a Lider con similar error, en concreto se pueden tener diferentes de hasta un ±15% (Ministerio de Vivienda y Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2007a).

⁸ La versión actual BSIM difiere tan sólo en que presenta un interfaz más amigable, obteniéndose con ambas aplicaciones resultados idénticos para un mismo edificio.

Métodos simplificados		Simplificado Grados-día (ASHRAE)	Simplificado corregido. Mé- todo 5000 y UNE - EN 832	Simplificado corregido. (refrigeración)
Clasificación	Datos necesarios para BE	(calefacción – refrigeración)	(calefacción)	
Parámetros climáticos	Temperaturas medias mensuales	●	●	●
	Insolación o radiación global media mensual sobre horizontal	●	●	●
Cerramiento	A: área cerramientos	●	●	●
	U: conductancia cerramientos	●		●
Renovación aire	U: conductancia cerramientos diferenciada día y noche		●	
	Nº horas aislamiento nocturno		●	
Ganancias solares	V: volumen climatizado	●	●	●
	n: coeficiente renovación aire constante		●	●
Ganancias internas	n: coeficiente renovación aire diferente verano e invierno	●		
	n: coeficiente renovación aire entre diferentes zonas		●	
Ganancias solares	t _b : temperatura base estimada al contabilizar las ganancias solares e internas mensuales	●		●
	Transmitancia media de los acristalamientos	●	●	●
Ganancias internas	Absortancia de los cerramientos	●		●
	Coeficiente de reducción por presencia de marcos y cortinas		●	
Ganancias internas	Coeficiente reducción radiación solar según grado de aislamiento y absorptancia del suelo		●	
	Inercia térmica del edificio (peso cerramiento y localización aislamiento en cerramiento. Define ganancia solar útil)		●	
Ganancias internas	Superficie construida del edificio		●	
	Factor corrector inercia edificio (baja o alta) y modo de utilización			●
Ganancias internas	Temperatura sol-aire para cerramientos opacos, se necesita la absorptancia de éste			●
	Factor corrector inercia			●
Ganancias internas	Ganancia interna media mensual	●	●	●
	Factor corrector inercia			●

Tabla 3.6. Resumen de datos necesarios para realizar el balance energético (BE) de edificios según varios métodos simplificados.

3.5. Procedimiento de validación del ‘método propuesto’ en urbanismo

Para llevar a cabo la validación del método propuesto para el análisis de la demanda energética de edificios, tal como recoge la figura 3.11, la metodología de validación emplea cinco tipos de edificio sometidos a seis climas diferentes, de este modo se pueden obtener multitud de simulaciones de la demanda energética de los edificios que permitirán la comparación con los resultados obtenidos con la aplicación dinámica TSBI3 y el método simplificado propuesto.

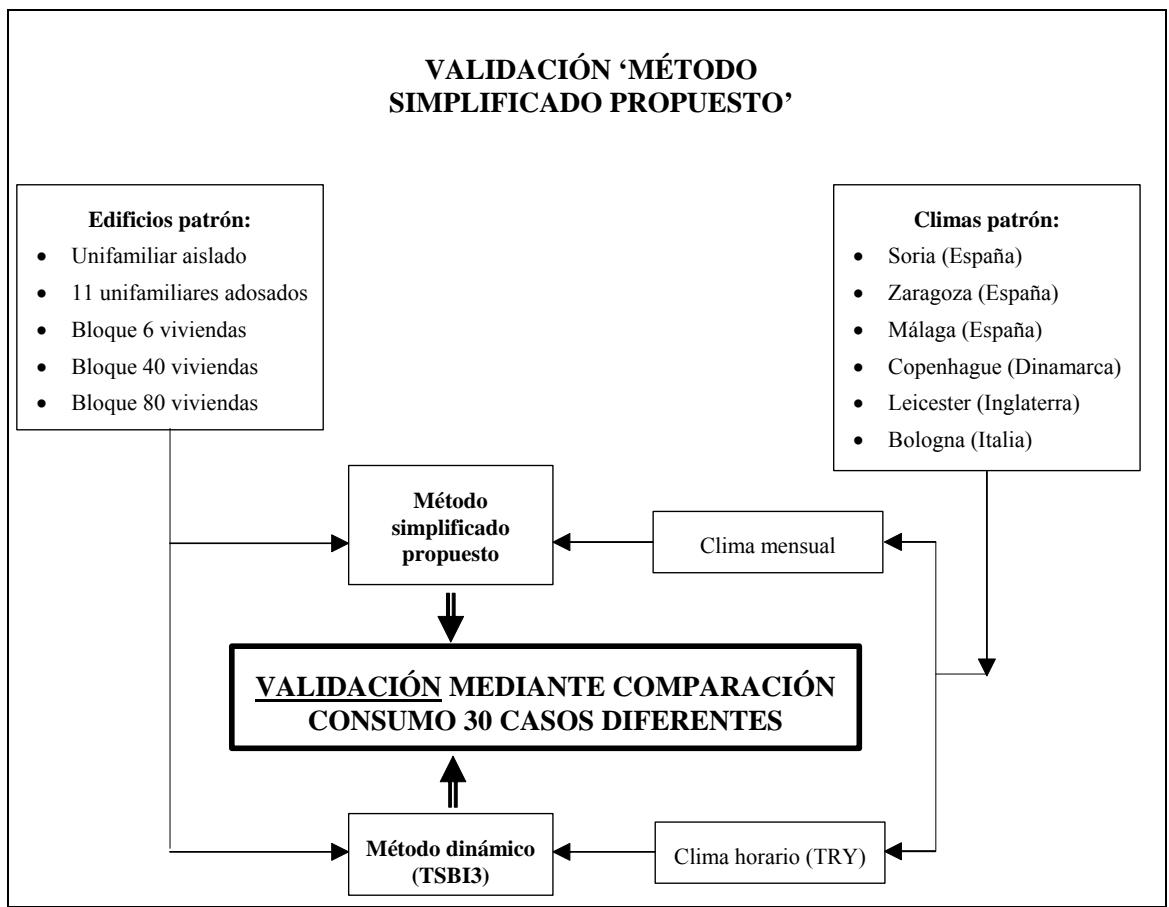


Figura 3.11. Metodología empleada para validar un método de simulación simplificado en urbanismo. La validación se realiza mediante la comparación de los resultados de demanda energética (calefacción y refrigeración) obtenidos con el método simplificado frente a la aplicación dinámica TSBI3 de los 30 casos (5 edificios sometidos a 6 climas diferentes) simulados con ambas aplicaciones.

Para realizar los test de validación se han elegido diferentes tipologías edificatorias con factores de forma dispares. Este parámetro indica la relación de la superficie exterior frente al volumen climatizado. Las tipologías empleadas permiten obtener un patrón adecuado para comparar demandas energéticas, preferible a utilizar un único edificio de validación como plantea la UNE-EN-832 (2000).

Los cinco edificios seleccionados abarcan un amplio rango de tipos constructivos siendo éstos:

- Vivienda unifamiliar aislada.
- 11 viviendas unifamiliares adosadas.
- Bloque de 6 viviendas.
- Bloque de 40 viviendas lineal.
- Bloque de 80 viviendas.

Para que las conclusiones no estén particularizadas para un clima único y existan diferentes relaciones entre ganancias y pérdidas en los edificios, se han trasladado con las mismas características constructivas (aislamientos, orientaciones, acristalamiento, ...) a seis climas diferentes, abarcando desde climas fríos hasta cálidos. Las poblaciones analizadas son Copenhague (Dinamarca), Leicester (Inglaterra), Bologna (Italia) y las españolas de Málaga, Soria y Zaragoza.

Con este abanico de edificios y climas también se ha podido estudiar la influencia de los parámetros relevantes del balance energético, incluyéndose estos análisis en el capítulo siguiente.

En los diferentes apartados que siguen se irán desarrollando los distintos elementos de la metodología de validación indicada en la figura 3.11, (características edificios, generación de climas, etc).

Como ya se ha indicado, la evaluación energética de un edificio se puede llevar a cabo con diferentes modelos de simulación, más o menos complejos. Partiendo de la premisa de que el análisis de la urbanización se realizará en la fase de prediseño y que por lo tanto no existirá un gran detalle de los edificios, no será interesante utilizar herramientas de simulación que requieran de gran definición de aspectos del edificio.

Con esta consideración el ‘método apropiado’ de análisis de edificios que se propone establecer en este capítulo deberá combinar una precisión suficiente con una definición sencilla del edificio que requiera tan sólo de los parámetros principales (forma, áreas, nivel de aislamiento, porcentaje acristalamiento, etc).

En puridad y, al objeto de validar un determinado método, bastaría con que éste condujera a una optimización similar a la obtenida con modelos mucho más sofisticados y complejos. El cálculo fino se obtendría, posteriormente, en el diseño de cada edificio que contaría con las mejores condiciones externas para reducir sus necesidades. Dado que el diseño del edificio se desarrolla en una fase posterior a la del plan urbanístico ésta es la única interacción necesaria para obtener, para cada edificio, la optimización ajustada a las características de diseño del mismo, dentro ya de una optimización para el conjunto urbanístico estudiado.

Por ello el método que plantea esta tesis parte de la definición de un método de cálculo suficientemente preciso y simple para evaluar de forma individual cada edificio de los constituyentes de una urbanización. Estos edificios serán, inicialmente, bloques de formas simples (alargados, torre, manzana, ...) con diferentes plantas y alturas de forma que se cumplan las exigencias externas (edificabilidad, normativa vigente, ...).

En un segundo nivel el método que puede evaluar la demanda energética de toda la urbanización, que será una extensión del método válido de análisis de un edificio, debe incidir especialmente en el sombreado que se producen los edificios entre ellos, siendo esta extensión objeto de exposición en el siguiente capítulo que remata finalmente el método de análisis de la urbanización completa que plantea la tesis. El programa de cálculo que sea capaz de evaluar toda el área urbanística deberá ser, pues:

- Razonablemente rápido, un test de una configuración no debe precisar más de algún minuto para su ejecución.
- El método energético, objetivo del presente capítulo, debe ser preciso y necesitar del menor número de parámetros posible.

- El método de diseño de la distribución urbanística debe permitir definir una configuración de forma simple y rápida.
- Todo ello deberá posibilitar la construcción de un algoritmo de cálculo que, completado con rutinas de cálculo de radiación, sombras, etc., permita la preparación de una aplicación informática.

En cuanto al método de cálculo, la validez de una aplicación se compara respecto a otra contrastada, simulando un edificio patrón y comprobando los resultados obtenidos entre ambas, la dificultad de este planteamiento parte del desconocimiento de la fiabilidad del programa test que, en este caso, se resuelve apoyándose en la aplicación danesa TSBI3.

A la vista de los resultados de Lomas k.J et al (1997) se ha elegido como aplicación patrón TSBI3 con la cuál se podrán validar diferentes programas o métodos de cálculo, siempre y cuando los modelos en ambas sean análogos y las hipótesis sean comparables.

Para el análisis comparativo se han definido cinco edificios diferentes sometidos a seis climas representativos, desde zonas frías hasta cálidas frente a la comparación única de un edificio modelado en varias aplicaciones. Con esta amplitud de análisis se han extraído conclusiones diversas que han permitido desarrollar un ‘método valido’ en urbanismo energético.

A continuación se van a exponer los diferentes análisis que se han llevado a cabo hasta concluir con el método de simulación a implementar para cálculos energéticos en urbanismo.

3.5.1. Selección de métodos de cálculo

Una vez mostradas las similitudes que existen entre los métodos simplificados expuestos en el Anexo D y la tabla 3.6, se ha seleccionado el Método 5000 como método simplificado de cálculo de la demanda de calefacción, ya que permite incluir elementos de arquitectura bioclimática (muros trombe, galerías acristaladas, ...) en los edificios. Este aspecto del diseño bioclimático⁹ se ha introducido en la aplicación informática desarrollada a raíz de esta tesis, permitiendo optimizar con estos elementos el aprovechamiento solar en función de las características de los edificios que componen la urbanización.

Los métodos de cálculo seleccionados que van a ser validados con el objetivo de obtener finalmente el método propuesto de análisis de edificios son:

- Método 5000, implementado en Meteo por la Universidad de Zaragoza y el Institut Ildefons Cerdà, 2000.
- Método Simplificado Corregido de Refrigeración (Santamouris M., 1997) obtenido a partir del método de los grados día (ASHRAE 1997).

⁹ Se ha señalado antes que el análisis urbanístico se hace en el segundo nivel mientras que el diseño de cada edificio corresponde al tercer nivel. Sin embargo, definidas las orientaciones de los edificios, la inclusión de galerías en orientaciones al sur es un elemento de la escala global como lo serán la definición de aleros, el % total de acristalamiento por fachada o el número de renovaciones considerado.

Ambos métodos se han expuestos en el apartado 3.2, siendo el objetivo verificar que permiten una precisión adecuada, o que mediante algunas modificaciones pueden mejorar sus resultados. Adelantándonos a los resultados que se mostrarán en este capítulo se puede señalar que se propone realizar una modificación al Método 5000 para la asignación de la inercia y en cuanto al método de refrigeración, se modificará la ecuación de captación solar a través de los cerramientos.

Con estos métodos se va a obtener la demanda de calefacción y refrigeración para los edificios modelados sometidos a los diferentes climas patrón.

Para simular cada edificio hay que construir un modelo de tal modo que para las diferentes herramientas de análisis sean ‘análogos’: idénticas condiciones de contorno de los cerramientos, iguales conductividades y espesores de materiales, temperaturas termostáticas, uso de edificio, etc.

Para que los modelos sean análogos es fundamental seguir los mismos criterios (medición cerramientos, renovación aire, ganancia interna, ...) a la hora de modelar los edificios. Conviene tener presente que la norma UNE-EN-832 (2000) señala que incluso con un mismo método se ha demostrado, mediante ensayos comparativos, que simulaciones modeladas por usuarios distintos pueden obtener resultados de la demanda de calefacción con diferencias de un 20% para un mismo edificio, en el mismo clima, debido a las razones siguientes:

- Diferentes datos de entrada a nivel nacional, que pueden ser distintos según los usuarios, entre otros la tasa de renovación o las ganancias internas asociadas.
- La forma de zonificar el edificio (monozona o multizona).
- El usuario puede proporcionar datos de entrada diferentes a partir de la misma base (por ejemplo, tomando las dimensiones sobre un plano).

Lógicamente, algunas de las posibles causas pueden reproducirse para un mismo usuario que trabaje con distintos métodos, por lo que para no cometer esta dispersión del 20% debida a la forma de modelar, hay que garantizar al validar el método simplificado que el modelo detallado, sea similar en lo posible, minimizando este error potencial en la comparativa.

El resultado que permitirá validar las aplicaciones es la demanda acumulada de calefacción y refrigeración, ya que con los métodos simplificados no se pueden obtener otros valores de comparación como podrían ser las temperaturas mínimas o máximas en períodos de utilización. En cualquier caso estas temperaturas corresponden a la simulación en el nivel de diseño no urbanístico sino de cada edificio en particular.

Los modelos realizados se han construido teniendo en cuenta las premisas anteriores.

3.5.2. Condiciones de referencia de cálculo (CRC) de edificios patrón

Conviene ahora definir de manera precisa las condiciones de simulación, Condiciones de Referencia de Cálculo (en adelante CRC) de edificios patrón, que permitirán evaluar el modelo propuesto. Para considerar las condiciones de cálculo de los edificios se han seguido en lo posible las indicaciones del nuevo Código Técnico de la Edificación (2006) y de la norma UNE-EN-832 (2000), existiendo la limitación de utilizar un modelo de cálculo medio mensual al que no se le pueden introducir por ejemplo variaciones horarias de la ocupación.

Para conseguir asimilar la ocupación y las temperaturas de confort horarias que plantea la herramienta LIDER del CTE (2006) se han realizado dos simplificaciones; la primera plantear una carga térmica interior constante a lo largo del día y que en media suponga un valor próximo al asignado en LIDER para edificios de viviendas y la segunda climatizar los espacios con la misma condición de temperatura de día y de noche.

Para todas las simulaciones realizadas de los edificios se van a considerar las siguientes condiciones de referencia (CRC) fijadas por:

- La temperatura de confort a mantener en el interior del edificio durante todo el día en los períodos calefacción y refrigeración es de 20°C y 25°C, temperaturas indicados para climatización durante el día en LIDER como valores de diseño en edificios.
- La tasa de renovación de aire más infiltraciones del edificio se fija en 0,5 renovaciones/hora.
- La ganancia interna del edificio por unidad de superficie climatizada es de 0,15 kWh/m² día, valor similar al utilizado en LIDER pero con distribución horaria diferenciada en éste.

3.5.3. Edificios patrón empleados en la validación

Los cinco edificios elegidos para realizar el análisis corresponden a tipologías diferentes en el ámbito del uso residencial que van desde viviendas aisladas hasta grandes bloques de viviendas o apartamentos como se define en la literatura especializada. Se pretende con ello recoger una muestra de posibles desarrollos urbanísticos, no tanto en la forma de los edificios, que corresponde a un segundo nivel de análisis, cuanto en la densidad superficial

Para cada edificio se han utilizado cerramientos específicos de similares grados de aislamiento, al presentar diferentes particularidades como, por ejemplo, cubiertas transitables frente a no transitables. La composición por capas de los diversos cerramientos se mostrará cuando se describa cada uno de los edificios.

Los valores de densidad, conductividad y capacidad térmica que caracterizan los materiales que componen los cerramientos de los edificios a modelar se han incluido en el Anexo A.

Estas tres propiedades son necesarias en los modelos desarrollados con la aplicación TSBI3, utilizando en la resolución del balance energético de los cerramientos ya que se utiliza el método de diferencias finitas. Sin embargo, para los métodos simplificados bastaría con la conductancia total del cerramiento, y para ellos se adopta el valor correspondiente.

En todos los edificios se han utilizado ventanas con carpintería metálica con doble vidrio siendo 0,65 la transmitancia estimada del acristalamiento.

Para determinar la conductancia de los cerramientos se han empleado los parámetros de resistencia superficial del nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE) similares a los de la norma previa NBECT-79. En la tabla D.1 se han incluido los valores de estos parámetros, permitiendo observar como se utilizan valores totales de resistencia similares en ambas normativas.

La mayor contribución a la inercia térmica de un edificio la hacen los forjados y tabiques interiores del edificio. Éstos no pierden energía de forma directa hacia el exterior y sirven de moduladores de la temperatura interior del edificio.

Para todos los edificios modelados, sus cerramientos interiores están constituidos por la composición de capas recogida en las tablas 3.7 y 3.8.

Tabique interior (U = 2,4 W/m² K)	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Ladrillo hueco	6
Enlucido yeso	1

Tabla 3.7. Características de las capas que conforman el tabique interior de las viviendas. El coeficiente de conducción de este cerramiento es de 2,4 W/m² K.

Forjado suelo (U = 2,1 W/m² K)	Espesor (cm)
Baldosa	2
Mortero cemento	5
Capa compresión	4
Bovedilla hormigón	25
Enlucido yeso	1

Tabla 3.8. Características de las capas que conforman el forjado interior de las viviendas. El coeficiente de conducción de este cerramiento es de 2,1 W/m² K.

A continuación se detallan los tipos de edificios seleccionados con sus dimensiones y características constructivas particulares, que se mantendrán para todos los climas analizados en este capítulo. Mientras que en el capítulo siguiente se someterán los edificios a diferentes cambios, por ejemplo variando los niveles de aislamientos o el porcentaje de acristalamientos con el objeto de estudiar la influencia de estos en el comportamiento del edificio.

3.5.3.1. Vivienda unifamiliar aislada

El primer tipo de edificio es una vivienda aislada de 99 m² construida en una sola planta separada del terreno mediante un forjado sanitario ventilado. La altura libre interior de la vivienda es de 2.5m. El factor de forma de la vivienda es de 1,186 1/m, resultando un valor muy desfavorable frente por ejemplo a una tipología de bloque de viviendas compacto, ya que es una configuración de elevada área exterior de cerramiento frente al volumen calefactado.

Esta casa cuenta con acristalamiento en todas las fachadas como indican la planta y los alzados de la vivienda (figuras 3.12 y 3.13).

Las superficies dimensionales y el grado de aislamiento se incluyen en la tabla 3.9, mientras que en las tablas 3.10 a 3.12 se adjuntan las capas que constituyen cada cerramiento.

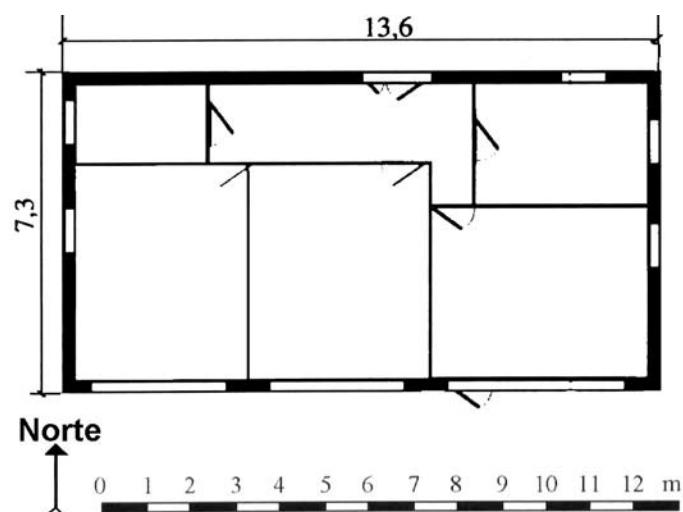


Figura 3.12. Planta vivienda unifamiliar aislada. (Fuente: Claux P., 1982)

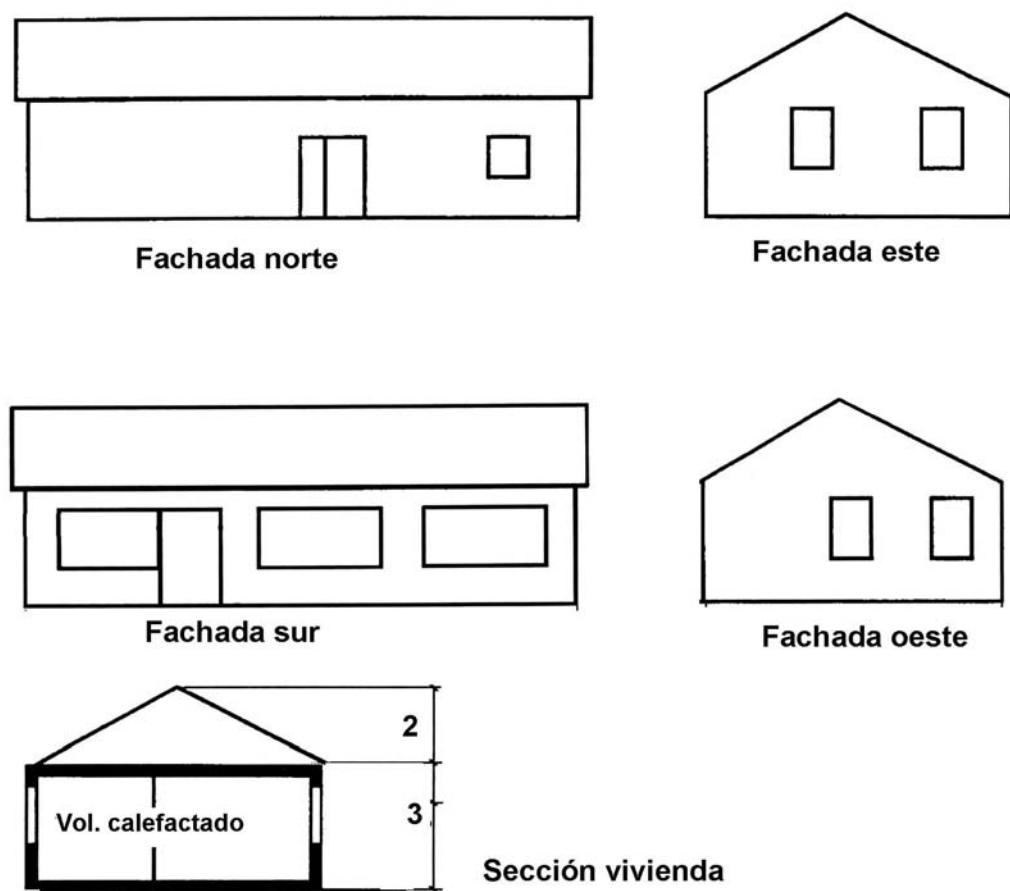


Figura 3.13. Alzados vivienda unifamiliar aislada. (Fuente: Claux P., 1982)

Cerramientos	Superficie (m ²)	Conductancia U (W/m ² K)
Muro fachadas verticales	81,7	0,87
Forjado cubierta	99	0,64
Forjado suelo	99	0,78
Tabique interior	102	2,4
Ventanas sur	12,7	4
Ventanas este	3	4
Ventanas oeste	3	4
Ventanas norte	4	4

Tabla 3.9. Superficie y conductancia de los cerramientos de la vivienda unifamiliar aislada.

La composición por capas de los cerramientos se detalla en las siguientes tablas en las que se incluye el nombre de cada capa y su espesor; el resto de características físicas (densidad, etc) se han incluido en la tabla A.1 del Anexo A. Para el resto de edificios se procede del mismo modo presentando los planos, las superficies de cerramientos, las conductancias y la configuración por capas de los diversos cerramientos.

Muro fachadas verticales	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Ladrillo hueco	4
Cámara aire	2
Fibra vidrio II	2
Mortero cemento	1
Ladrillo perforado	11.5

Tabla 3.10. Características de las capas que conforman el muro de las fachadas verticales de la vivienda unifamiliar aislada.

Forjado cubierta	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Bovedilla hormigón	25
Capa compresión	4
Fibra vidrio I	4
Cámara aire	20
Ladrillo hueco	4
Mortero cemento	2
Teja plana	1

Tabla 3.11. Características de las capas que conforman el forjado de cubierta de la vivienda unifamiliar aislada.

Forjado suelo	Espesor (cm)
Baldosa	2
Mortero cemento	5
Fibra vidrio IV	2
Capa compresión	4
Bovedilla hormigón	25

Tabla 3.12. Características de las capas que conforman el forjado sanitario de separación con el suelo de la vivienda unifamiliar aislada.

3.5.3.2. Unifamiliares adosadas

Para completar la tipología de viviendas unifamiliares se ha escogido 11 viviendas adosadas. Cada vivienda tiene una superficie de 90 m², desarrollada en dos plantas de 2.5 m de altura libre cada una. En las figuras 3.13 a 3.16 se muestran las plantas y alzados de las viviendas.

El factor de forma total de los 11 unifamiliares es de 0,81 l/m, resultando un 32% más compacta esta configuración respecto al caso anterior de la vivienda unifamiliar aislada.

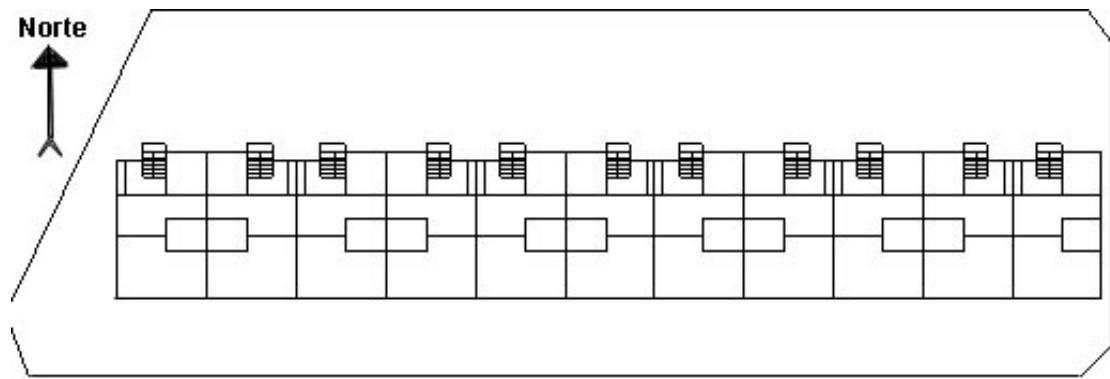


Figura 3.13. Planta general de viviendas unifamiliares adosadas.

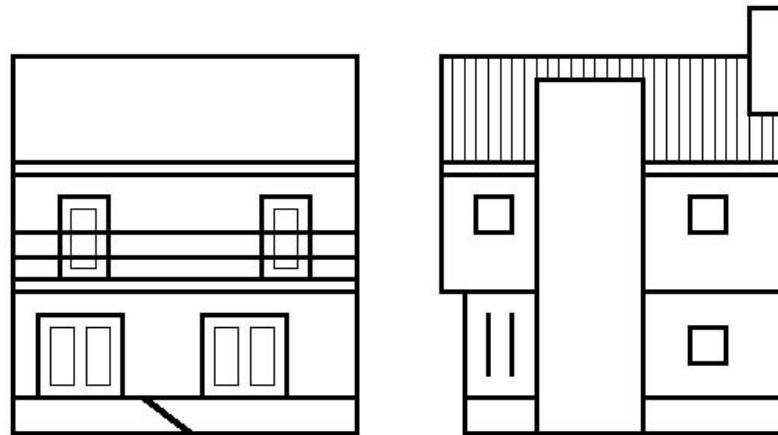


Figura 3.14. Alzados sur (izquierda) y norte (derecha) de una vivienda tipo de los 11 unifamiliares adosadas.

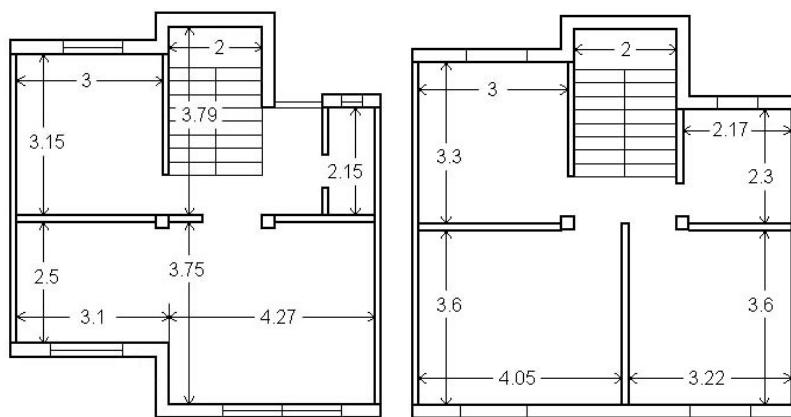


Figura 3.15. Planta baja y primera de una vivienda tipo de los 11 unifamiliares adosadas.

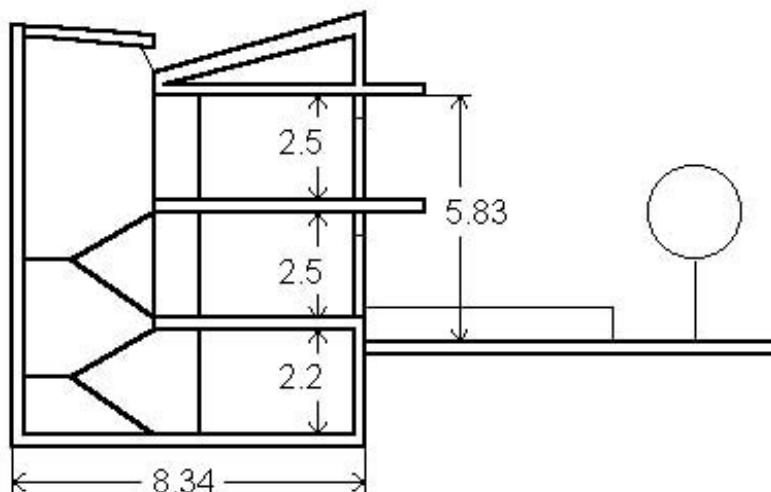


Figura 3.16. Sección en una vivienda de los 11 unifamiliares adosadas.

En la tabla 3.13 se incluyen los datos constructivos de los cerramientos del conjunto de viviendas.

Cerramientos	Superficie (m ²)	Conductancia U (W/m ² K)
Muro fachadas verticales	849,9	0,87
Forjado cubierta	678	0,64
Forjado suelo	510	0,82
Tabique interior	400	2,4
Forjado interior	678	2,1
Ventanas sur	172	4
Ventanas norte	36	4

Tabla 3.13. Superficie y conductancia de los cerramientos de las 11 viviendas unifamiliares adosadas.

En las tablas siguientes se incluyen las capas que conforman los cerramientos en estas viviendas adosadas.

Muro fachadas verticales	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Ladrillo hueco	4
Cámaras aire	2
Fibra vidrio II	2
Mortero cemento	1
Ladrillo perforado	11.5

Tabla 3.14. Características de las capas que conforman el muro de las fachadas verticales de las 11 viviendas unifamiliares adosadas.

Forjado cubierta	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Bovedilla hormigón	25
Capa compresión	4
Fibra vidrio I	4
Cámaras aire	20
Ladrillo hueco	4
Mortero cemento	2
Teja plana	1

Tabla 3.15. Características de las capas que conforman el forjado de cubierta de las 11 viviendas unifamiliares adosadas.

Forjado suelo	Espesor (cm)
Baldosa	2
Mortero cemento	5
Fibra vidrio IV	2
Capa compresión	4
Bovedilla hormigón	25
Enlucido yeso	1

Tabla 3.16. Características de las capas que conforman el forjado del suelo de la primera planta del edificio de las 11 viviendas unifamiliares adosadas.

3.5.3.3. Bloque de 6 viviendas

Este edificio es el propuesto como ejemplo en la Certificación Energética del País Vasco desarrollada por el Cadem en el programa de cálculo PEEV (1992).

El número de viviendas que contiene el edificio es de seis, teniendo una superficie útil cada piso de 60 m². El edificio tiene 3 plantas de altura con una altura libre interior de 2,5 m cada una, en las figuras 3.17 a 3.19 se muestran las plantas y alzados de las viviendas.

El factor de forma del bloque de viviendas es de 0,663 1/m, resultando un 44% más compacto que la vivienda unifamiliar y un 18% más que la configuración de 11 unifamiliares.

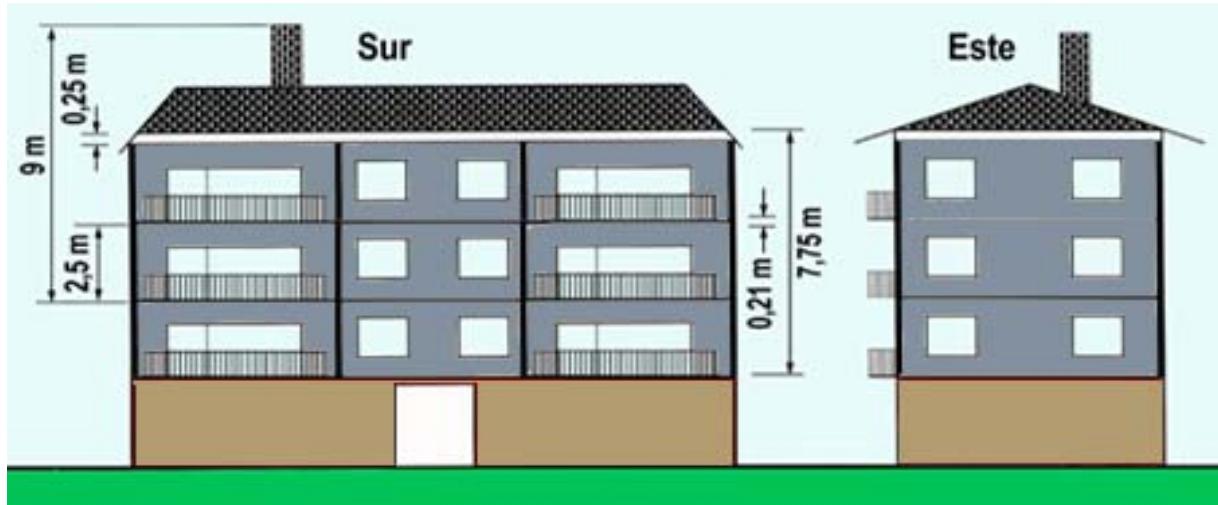


Figura 3.17. Alzado sur y este del bloque de seis pisos. (Fuente: CADEM, 1992).



Figura 3.18. Alzado oeste y norte del bloque de seis pisos. (Fuente: CADEM, 1992).

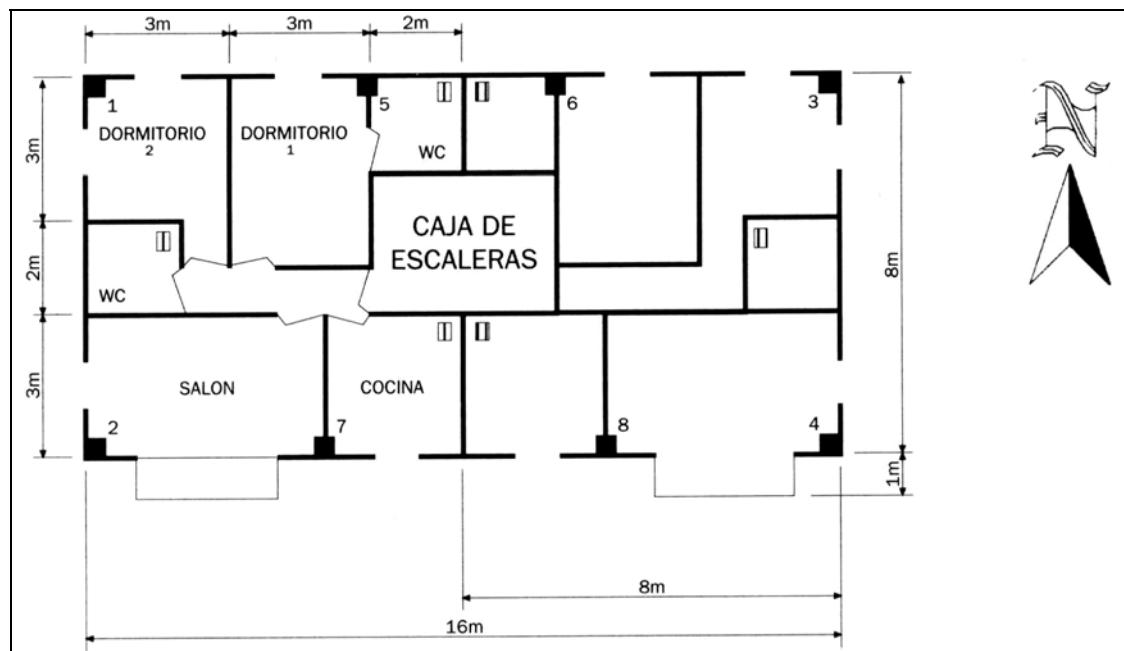


Figura 3.19. Planta tipo del bloque de seis pisos. (Fuente: CADEM, 1992).

En la tabla 3.17 se incluyen los datos constructivos de los cerramientos del conjunto de pisos.

Cerramientos	Superficie (m ²)	Conductancia U (W/m ² K)
Muro fachadas verticales	314	0,71
Forjado cubierta	128	0,49
Forjado suelo	128	0,72
Tabique interior	120	2,4
Forjado interior	256	2,1
Ventanas sur	42	4
Ventanas este	6	4
Ventanas oeste	6	4
Ventanas norte	12	4

Tabla 3.17. Superficie y conductancia de los cerramientos del bloque de 6 pisos.

En las tablas 3.18 a 3.20 se incluyen las capas que conforman los cerramientos de estos pisos.

Muro fachadas verticales	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Ladrillo hueco	4
Cámara aire	2
Fibra vidrio II	3
Mortero cemento	1
Ladrillo perforado	11.5

Tabla 3.18. Características de las capas que conforman el muro de las fachadas verticales del bloque de 6 pisos.

Forjado cubierta	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Bovedilla hormigón	25
Capa compresión	4
Fibra vidrio I	6
Cámara aire	20
Ladrillo hueco	4
Mortero cemento	2
Teja plana	1

Tabla 3.19. Características de las capas que conforman el forjado de cubierta del bloque de 6 pisos.

Forjado suelo	Espesor (cm)
Baldosa	2
Mortero cemento	5
Fibra vidrio IV	3
Capa compresión	4
Bovedilla hormigón	25
Enlucido yeso	1

Tabla 3.20. Características de las capas que conforman el forjado del suelo de la primera planta del edificio del bloque de 6 pisos.

3.5.3.4. Bloque de 40 viviendas

Este edificio es un bloque de cinco plantas de altura con dos pisos por rellano de escalera. Con esta configuración las viviendas poseen facilidad para la ventilación cruzada al tener ventanas a fachadas contrarias, norte y sur.

El bloque tiene 40 pisos con una superficie útil cada piso de 90 m². La altura libre interior de cada planta es de 2,5 m contando con 4 escaleras de acceso a las viviendas. En las figuras 3.20 a 3.23 se muestran las plantas y alzados de las viviendas.

El factor de forma del bloque de 40 viviendas es de 0,404 1/m, resultando un 66% más compacto que la vivienda unifamiliar, un 50% más que la configuración de 11 unifamiliares y respecto al edificio en bloque de 6 viviendas resulta es un 39% más compacto.

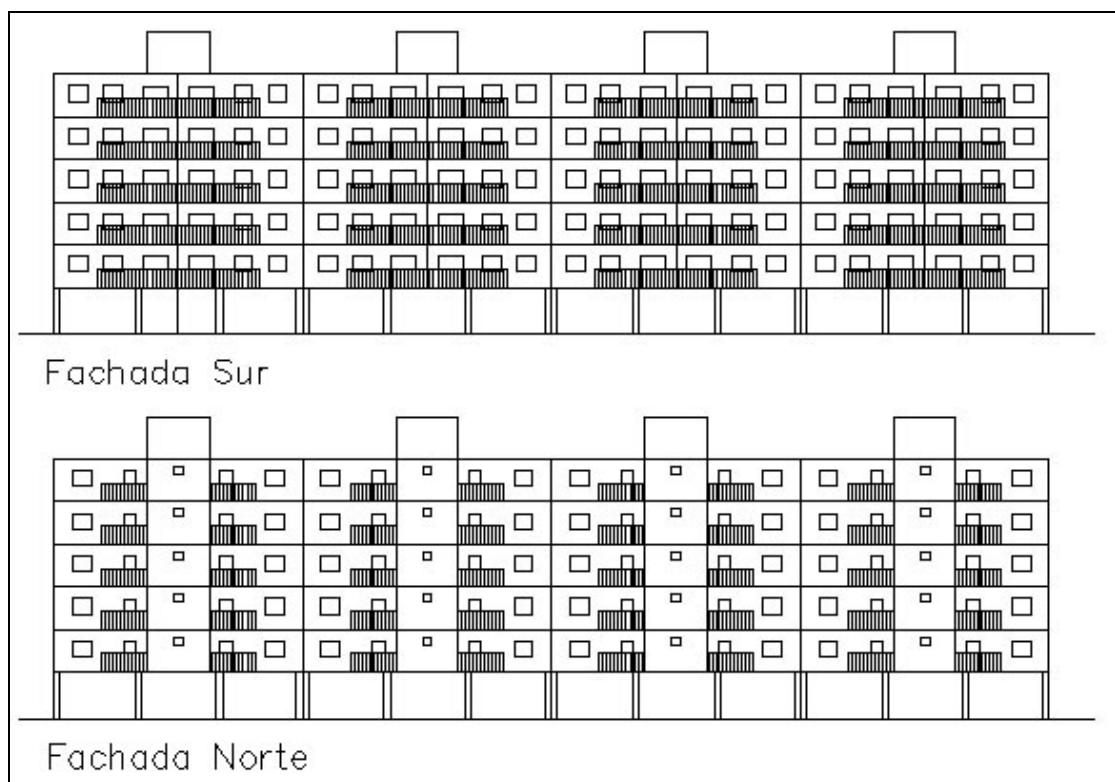


Figura 3.20. Alzado sur y norte del bloque de 40 viviendas.

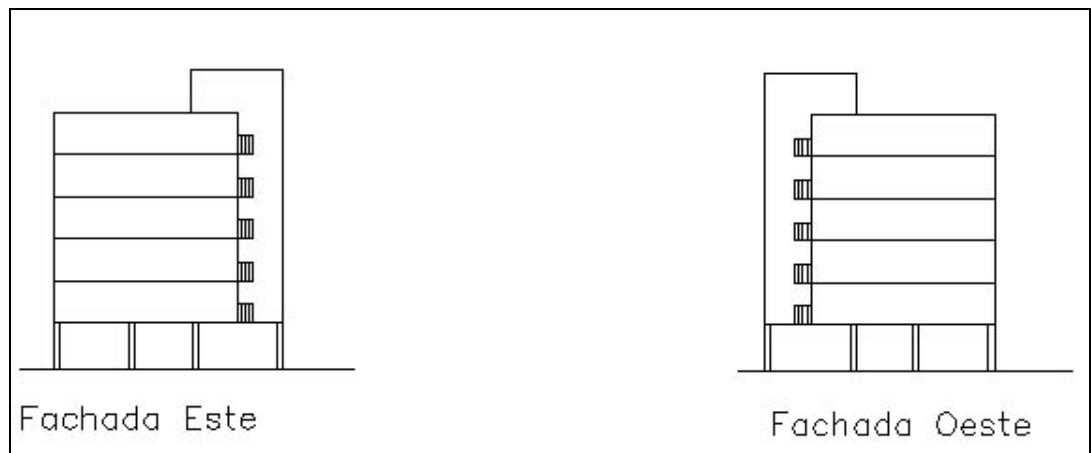


Figura 3.21. Alzado este y oeste del bloque de 40 viviendas.

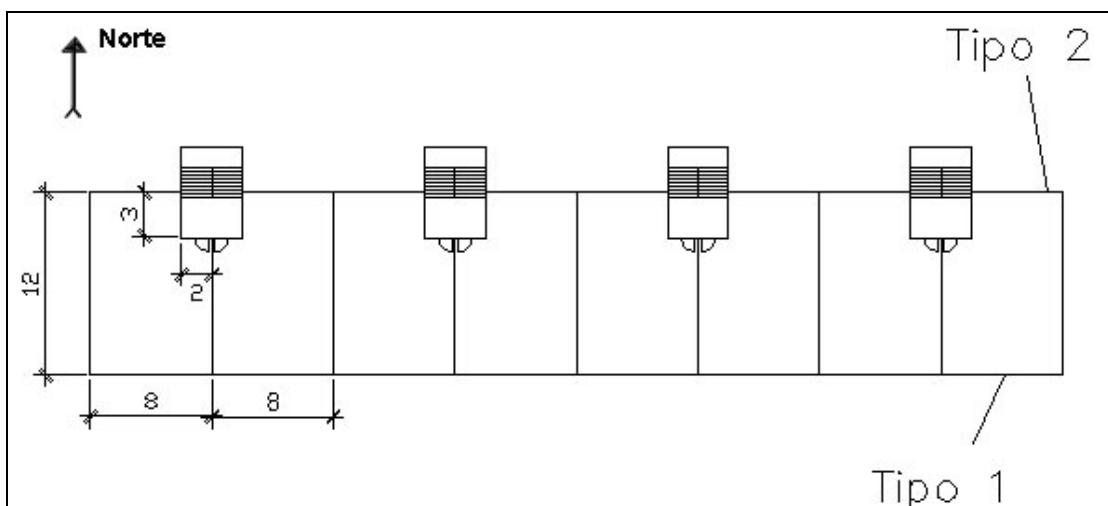


Figura 3.22. Planta del bloque de 40 viviendas, con referencia del tipo de fachada en cada vivienda.

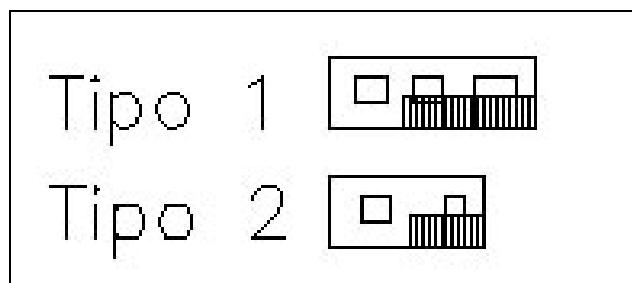


Figura 3.23. Fachadas tipo sur (Tipo 1) y norte (Tipo 2) del bloque de 40 viviendas.

En la tabla 3.21 se incluyen los datos constructivos de los cerramientos del bloque de viviendas.

Cerramientos	Superficie (m ²)	Conductancia U (W/m ² K)
Muro fachadas verticales	1348	0,87
Forjado cubierta	720	0,91
Forjado suelo	720	0,72
Muro separación escalera	500	1,44
Tabique interior	800	2,4
Forjado interior	2160	2,1
Ventanas sur	224	4
Ventanas este	0	4
Ventanas oeste	0	4
Ventanas norte	128	4

Tabla 3.21. Superficie y conductancia de los cerramientos del bloque de 40 pisos.

En las tablas 3.22 a 3.25 se incluyen las capas que conforman los cerramientos de estos 40 pisos.

Muro fachadas verticales	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Ladrillo hueco	4
Cámaras aire	2
Fibra vidrio II	2
Mortero cemento	1
Ladrillo perforado	11.5

Tabla 3.22. Características de las capas que conforman el muro de las fachadas verticales del bloque de 40 viviendas.

Forjado cubierta	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Bovedilla hormigón	25
Capa compresión	4
Poliestireno extrusionado	2
Mortero cemento	4
Lamina bituminosa	1
Mortero cemento	2
Grava rodada	5

Tabla 3.23. Características de las capas que conforman el forjado de cubierta.

Forjado suelo	Espesor (cm)
Baldosa	2
Mortero cemento	5
Fibra vidrio IV	3
Capa compresión	4
Bovedilla hormigón	25
Enlucido yeso	1

Tabla 3.24. Características de las capas que conforman el forjado del suelo de la primera planta del edificio del bloque de 40 viviendas.

Muro separación escalera	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Ladrillo hueco	9
Cámara aire	1
Ladrillo hueco	4
Enlucido yeso	1

Tabla 3.25. Características de las capas que conforman el tabique de separación de los pisos con el hueco de la escalera no calefactado del bloque de 40 viviendas.

3.5.3.5. Bloque de 80 viviendas

Este edificio es similar al anterior obtenido al practicar una simetría respecto a la fachada norte y creando patios interiores. Cada escalera en este caso da acceso a cuatro viviendas.

El bloque tiene 80 pisos con una superficie útil cada piso de 90 m². La altura libre interior de cada planta es de 2,5 m, contando con cuatro escaleras de acceso a las viviendas. En las figuras 3.24 a 3.27 se muestran las plantas y alzados de las viviendas.

De todos los edificios analizados el edificio de 80 viviendas en bloque es el más compacto presentando un factor de forma de 0,395 1/m, resultando un 67% más compacto que la vivienda unifamiliar, un 51% más que la configuración de 11 unifamiliares, respecto al edificio en bloque de 6 viviendas resulta un 40% más compacto y simular compacidad que el edificio en bloque de 40 viviendas tiene diferenciándose en tan sólo un 2%.

De los datos anteriores queda patente que la compacidad o factor de forma presenta un límite asintótico en los edificios de viviendas y que a partir de un cierto número de viviendas la relación de área exterior frente a volumen calefactado se mantiene casi inalterable entorno a un 0,4 1/m, o su inverso denominado compacidad equivale a 2,5 m.

En el documento de opción simplificada de certificación energética de edificios de viviendas (Ministerio de Vivienda y Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2007b) también se ha tomado como valor para diferenciar edificios compactos el valor de 2,5 m.

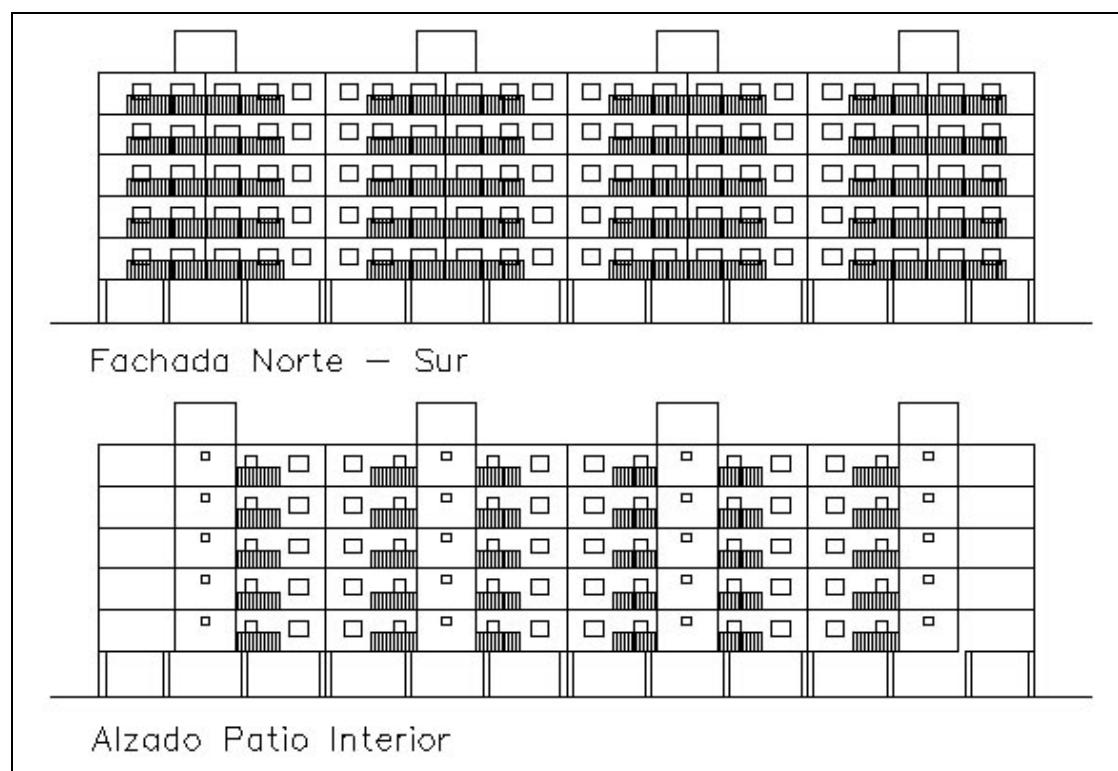


Figura 3.24. Alzado sur, norte y patio interior del bloque de 80 viviendas.

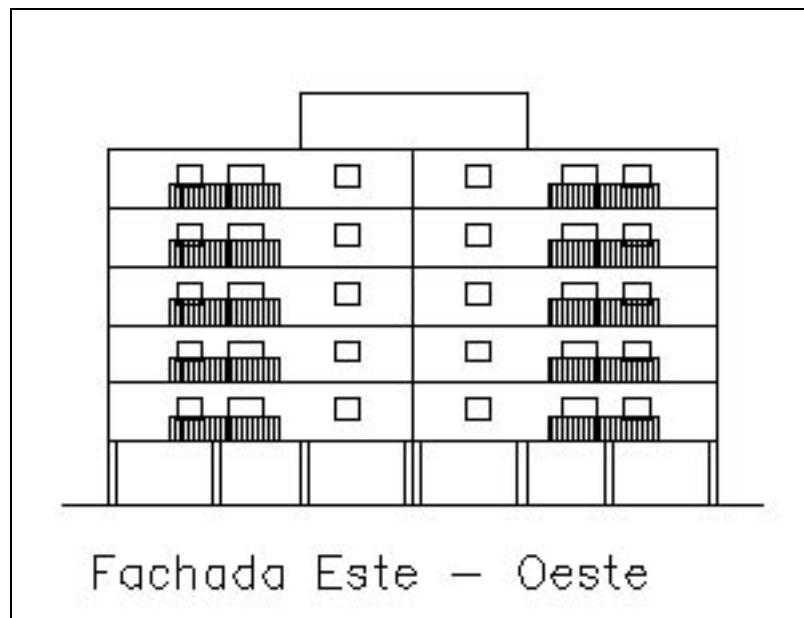


Figura 3.25. Alzado este y oeste del bloque de 80 viviendas.

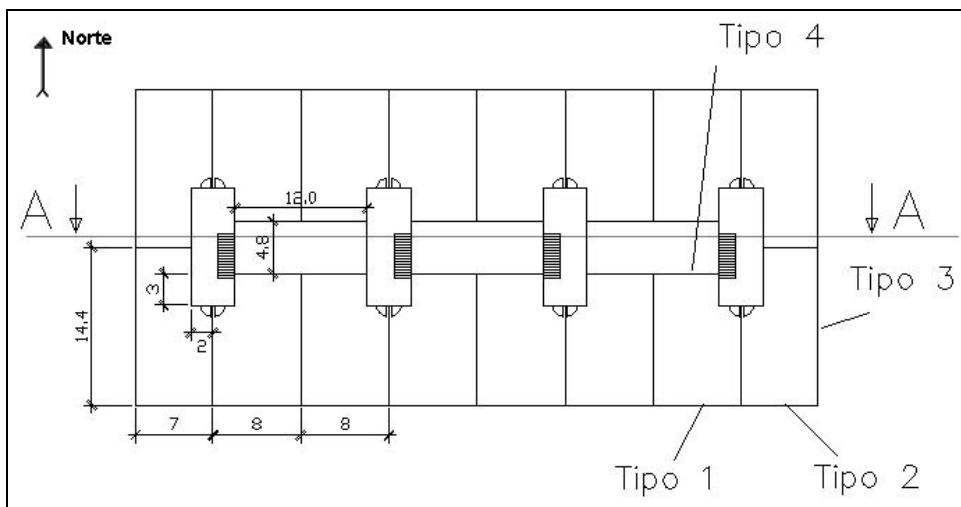


Figura 3.26. Planta del bloque de 80 viviendas, con referencia del tipo de fachada en cada vivienda.

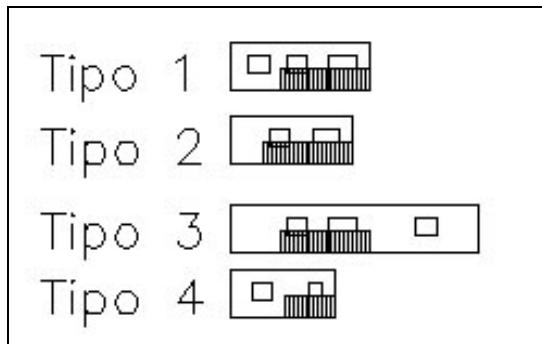


Figura 3.27. Fachadas tipo del bloque de 80 viviendas.

En la tabla 3.26 se incluyen los datos constructivos de los cerramientos del bloque de 80 viviendas.

Cerramientos	Superficie (m ²)	Conductancia U (W/m ² K)
Muro fachadas verticales	2933	0,87
Forjado cubierta	1440	0,91
Forjado suelo	1440	0,81
Muro separación escalera	1120	1,44
Tabique interior	1500	2,4
Forjado interior	4320	2,1
Ventanas sur	212	4
Ventanas este	56	4
Ventanas oeste	56	4
Ventanas norte y a patios interiores	380	4

Tabla 3.26. Superficie y conductancia de los cerramientos del bloque de 80 pisos.

En las tablas 3.27 a 3.30 se incluyen las capas que conforman los cerramientos de estos 80 pisos.

Muro fachadas verticales	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Ladrillo hueco	4
Cámara aire	2
Fibra vidrio II	2
Mortero cemento	1
Ladrillo perforado	11.5

Tabla 3.27. Características de las capas que conforman el muro de las fachadas verticales del bloque de 80 pisos.

Forjado cubierta	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Bovedilla hormigón	25
Capa compresión	4
Poliestireno extrusionado	2
Mortero cemento	4
Lamina bituminosa	1
Mortero cemento	2
Grava rodada	5

Tabla 3.28. Características de las capas que conforman el forjado de cubierta del bloque de 80 pisos.

Forjado suelo	Espesor (cm)
Baldosa	2
Mortero cemento	5
Fibra vidrio IV	2
Capa compresión	4
Bovedilla hormigón	25
Enlucido yeso	1

Tabla 3.29. Características de las capas que conforman el forjado del suelo de la primera planta del edificio del bloque de 80 pisos.

Muro separación escalera	Espesor (cm)
Enlucido yeso	1
Ladrillo hueco	9
Cámara aire	1
Ladrillo hueco	4
Enlucido yeso	1

Tabla 3.30. Características de las capas que conforman el tabique de separación de los pisos con el hueco de la escalera no calefactado del bloque de 80 pisos.

3.5.4. Generación del clima horario en la validación

Para realizar el balance energético de un edificio es necesario disponer de los datos climáticos apropiados para el método utilizado.

Según lo analizado en secciones anteriores, aunque para los métodos simplificados basta con utilizar datos medios mensuales más accesibles, en los métodos de simulación complejos es necesario disponer de datos climáticos horarios, inexistentes en la mayoría de las poblaciones.,

En el punto 3.3 se ha realizado una descripción de los parámetros climáticos necesarios para generar los ficheros TRY (Test Reference Year) que se utilizan en las aplicaciones de cálculo dinámico.

El primer problema a solventar es el de la generación de ficheros TRY válidos para las localidades analizadas ya que no se dispone de datos adecuados para las poblaciones españolas. Los datos que facilita el Instituto Nacional de Meteorología son valores medios mensuales obtenidos de series suficientemente largas de tiempo.

En la actualidad el Instituto está registrando datos horarios en la mayor parte de estaciones de las que dispone a lo largo de la geografía española, pero estos datos todavía no conducen a series fiables con un número de años como para obtener un TRY adecuado.

Dadas estas dificultades se ha construido un generador climático horario que a partir de datos medios mensuales facilita un día medio con datos horarios para cada mes, el cual repetido por el número de días del mes constituirá un año de datos climáticos TRY. A este fichero se le va a denominar ‘fichero sintético TRY’. Conviene precisar que, a los efectos del objetivo de la tesis, aunque el TRY teórico presenta desviaciones respecto del real eso no supone un problema en cuanto a la validación buscada para nuestro ‘método válido’ respecto del método TSB13. El mayor efecto de esta desviación será en los cálculos horarios para una población determinada que, probablemente, diferirán respecto del comportamiento real debido al sistema de generación que suaviza los extremos naturales que aparecen en un TRY real.

En cuanto a los cálculos que nos interesan, demandas acumuladas, en el apartado 3.3.2.1 se muestra cómo las variaciones de demandas anuales que se obtuvieron en diferentes casos con ficheros sintéticos TRY diferían hasta un 5% respecto a la demanda con el TRY construido con datos horarios reales. Esta circunstancia es otro elemento que aporta indeterminación ligada a los valores estadísticos utilizados.

Para utilizar la aplicación TSBI3 se necesitan ficheros TRY. Expuestas ya las dificultades de obtener datos fiables horarios en la mayor parte de poblaciones, se ha recurrido a generar ficheros sintéticos TRY, mediante una aplicación informática propia, aplicando el método expuesto en el artículo de Bahadori M.N. et al (1986) y recogido en el apartado 3.3.2.1.

Los datos necesarios para generar este fichero son:

- Temperaturas medias mensuales máximas y mínimas
- La radiación global media mensual sobre horizontal u otro parámetro que permita obtenerla

En los métodos detallados no basta con introducir la radiación global horaria sobre horizontal. Hace falta otro parámetro independiente, por ejemplo, la radiación difusa horaria sobre la horizontal ($I_d(h)$) (Iqbal M., 1983).

Para poder realizar la simulación dinámica en TSBI3 es necesario añadir los datos de entrada al generador de los valores medios mensuales de:

- Humedad
- Velocidad del viento

La humedad horaria se ha generado a partir de la temperatura horaria y con la consideración de que la humedad media es relativamente constante a lo largo del día (Goulding J.R. et al, 1993). Bajo esta hipótesis se determina la temperatura media diaria del mes analizado y con su humedad media se halla la presión de vapor media.

El otro parámetro necesario en TSBI3 es la velocidad del viento, en este caso se ha supuesto la velocidad media constante para todo el día.

En las aplicaciones de cálculo la velocidad del viento no se utiliza para modificar la resistencia superficial de los cerramientos del edificio, calculándose con los valores constantes que en los diferentes países fijan las normativas.

En TSBI3 la velocidad del viento puede modificar la tasa de renovación de aire del edificio. En los cálculos realizados en la tesis se ha anulado esta función para poder comparar con métodos simplificados los cuales no tienen en cuenta la modificación de la tasa de renovación.

3.5.4.1. Test de validación en la construcción de los TRY sintéticos

Para comprobar la validez de los TRY sintéticos frente a los obtenidos a partir de datos horarios climáticos, se ha calculado para el clima de Copenhague la demanda de calefacción de los cinco edificios patrón.

Se ha aprovechado que la aplicación TSBI3 incorpora el clima horario de Copenhague (en este caso es un TRY real) en su base de datos, construyéndose el TRY sintético con el ‘Generador Climático’ a partir de los datos de la Commission of the European Communities (Lund H., 1985) que contiene los datos medios mensuales de Copenhague entre las 29 poblaciones europeas analizadas.

Los modelos de los cinco edificios patrón se han sometido a los dos climas TRY y a variaciones de la absorbancia exterior de los cerramientos comprendida entre 0,2 a 0,8 (incluye desde acabados de colores claros a oscuros), que permiten evaluar la importancia de la captación solar a través de los cerramientos que envuelven al edificio en invierno. Las condiciones del cálculo son las definidas en las Condiciones de Referencia de Cálculo (CRC), apartado 3.5.2.

En la tabla 3.31 y 3.32 se incluyen los resultados de demanda de calefacción por unidad de área calefactada (IEA, 1997) con el fichero de clima real y con el sintético. Como era de esperar, se comprueba una fuerte correlación con el factor de forma de los edificios, como puede observarse en la figura 3.28 en la que se muestra la evolución de la demanda de calefacción para los diferentes coeficientes de absorbancia para el caso del clima TRY real de Copenhague. De la figura se puede observar como aumenta la demanda según se incrementa el factor de forma (edificios menos compactos).

Edificio	Demanda calefacción ($\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ año}$) para diferentes absorbancias de los cerramientos del edificio			
	0,2	0,4	0,6	0,8
Vivienda unifamiliar aislada	264,2	257,4	250,8	244,5
11 Unifamiliares adosadas	172,7	168,4	164,3	160,3
Bloque 6 pisos	125,2	122,5	120,0	117,6
Bloque 40 pisos	104,2	101,2	98,4	95,8
Bloque 80 pisos	105,2	102,5	100,0	97,7

Tabla 3.31. Demanda de calefacción por unidad de área calefactada en edificios patrón localizados en Copenhague. Se ha utilizado el TRY real generado a partir de mediciones horarias de clima. El nivel de aislamiento de los cerramientos es el definido en los edificios patrón utilizando las Condiciones de Referencia de Cálculo (CRC).

Edificio	Demanda calefacción ($\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ año}$) para diferentes absorbancias de los cerramientos del edificio			
	0,2	0,4	0,6	0,8
Vivienda unifamiliar aislada	271,3	265,0	258,9	252,8
11 Unifamiliares adosadas	179,6	175,4	171,5	167,4
Bloque 6 pisos	129,9	127,4	125,0	122,8
Bloque 40 pisos	105,8	102,9	100,1	97,6
Bloque 80 pisos	104,7	101,9	99,3	96,9

Tabla 3.32. Demanda de calefacción por unidad de área calefactada en edificios patrón localizados en Copenhague. Se ha utilizado el TRY sintético generado con el método de Bahadori M.N. et al (1986). El nivel de aislamiento de los cerramientos es el definido en los edificios patrón utilizando las Condiciones de Referencia de Cálculo (CRC).

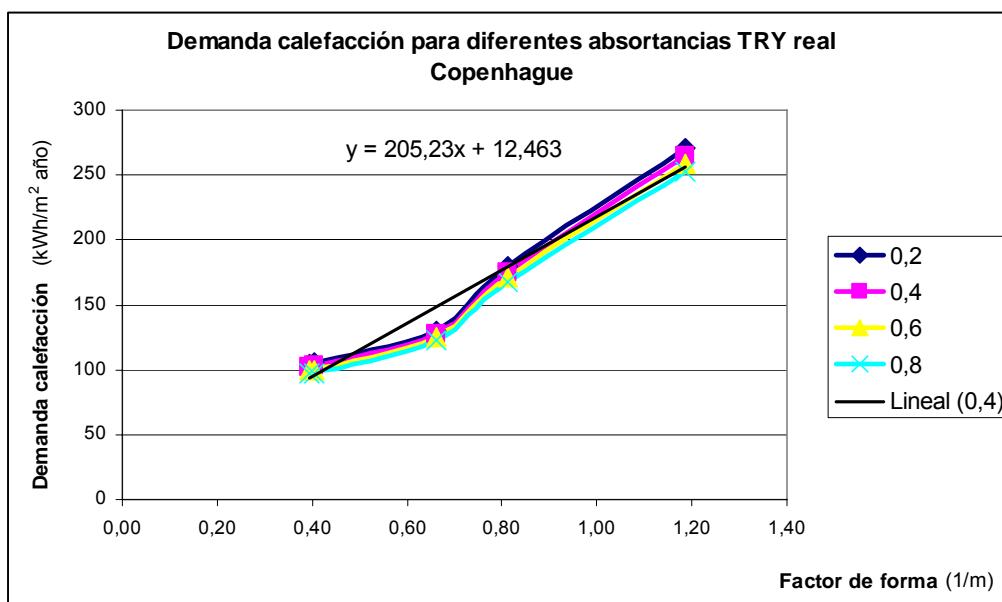


Figura 3.28. Evolución de la demanda de calefacción anual por unidad de superficie construida para el conjunto de edificios analizados incluyendo diferentes factores de forma. Los edificios se han simulado con el TRY real de Copenhague. Se puede observar como aumenta casi linealmente la demanda de los edificios según aumenta su factor de forma (como puede verse de la correlación linealizada para absorción 0,4) al contar con mayor superficie exterior respecto al volumen calefactado y a su vez derivarse menor inercia térmica al ser menos compacto el edificio.

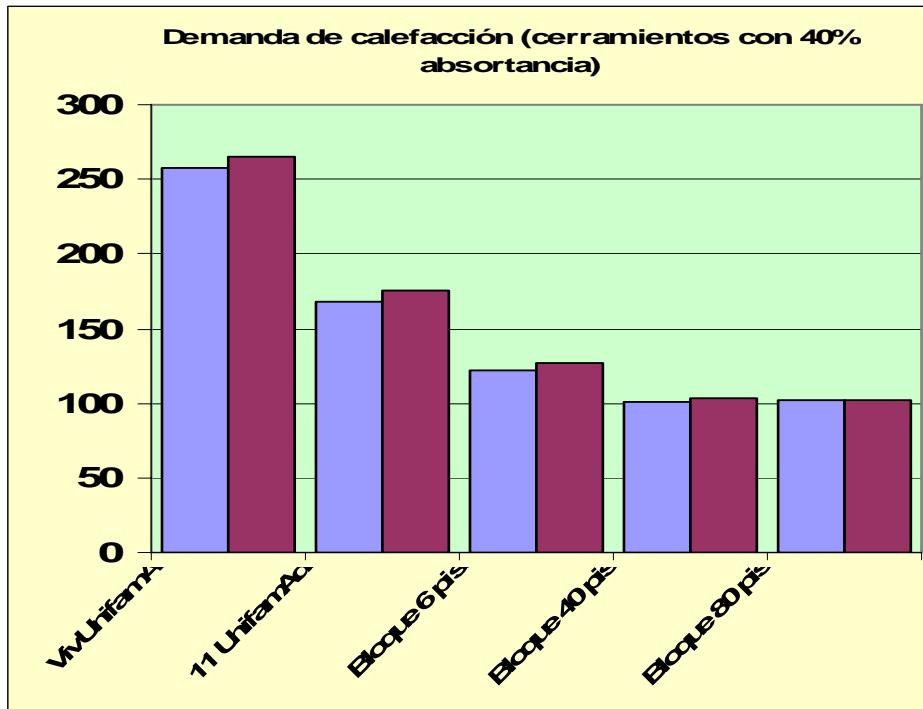


Figura 3.29. Resultados de la simulación utilizando TRY real de Copenhague y TRY sintético. La evolución refleja, de un lado la dependencia del factor de forma y la disminución de la diferencia entre ambos modelos al aumentar la masa térmica.

La figura anterior muestra los resultados de la simulación en las condiciones señaladas (Tablas 3.31 y 3.32, columna correspondiente a una absorción en cerramientos del 40%). En ella queda evidente la importancia del factor de forma y la equivalencia entre ambos modos de cálculo: con TRY real o TRY sintético en lo que afecta a los valores medios de demanda anual. Como muestra la tabla de desviaciones porcentuales, éstas se reducen así como aumenta la inercia térmica del edificio. Es lógica esta evolución pues la inercia térmica actúa suavizando las fluctuaciones externas del clima, efecto que se introduce en el caso del TRY sintético por el método utilizado.

Por lo mismo, el TRY sintético reflejará la máxima diferencia con el real en la simulación horaria de temperaturas, en particular cuando exista sobrecalentamiento siguiendo la tendencia de la figura 3.29.

La variación entre ambos cálculos (TRY real y TRY sintético) se mueve desde un -0,8% y un 4,2% aumentando así como se reduce la masa térmica del edificio analizado.

Este resultado es similar a los resultados obtenidos por Cannistraro G. et al (1995) ya mencionados, en el que se planteaba una diferencia máxima de un 5%.

Los resultados de las variaciones porcentuales de demanda se pueden analizar en la tabla 3.33 y en la figura 3.30.

Edificio	Variación demanda TRY real / TRY sintético para diferentes absorción (%) exteriores de los cerramientos del edificio			
	0,2	0,4	0,6	0,8
Vivienda unifamiliar aislada	2,6%	2,9%	3,1%	3,3%
11 Unifamiliares adosadas	3,8%	4,0%	4,2%	4,2%
Bloque 6 pisos	3,6%	3,8%	4,0%	4,2%
Bloque 40 pisos	1,6%	1,6%	1,7%	1,8%
Bloque 80 pisos	-0,4%	-0,6%	-0,7%	-0,8%

Tabla 3.33. Variación de la demanda de calefacción por unidad de área calefactada en edificios patrón con TRY generado a partir de mediciones horarias respecto al obtenido con el TRY sintético. El nivel de aislamiento de los cerramientos es el definido en los edificios patrón utilizando las CRC (en negrita se destacan las desviaciones máxima y mínima).

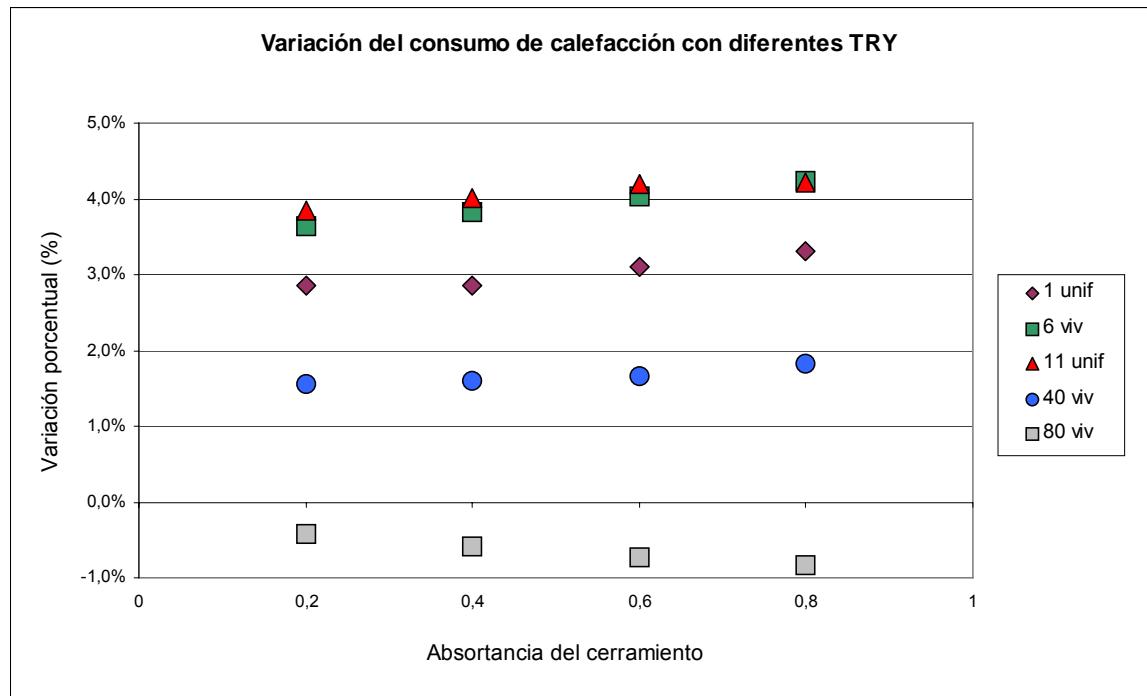


Figura 3.30. Variación de la demanda de calefacción por unidad de área calefactada en edificios patrón con TRY generado a partir de mediciones horarias respecto al obtenido con el TRY sintético. El nivel de aislamiento de los cerramientos es el definido en los edificios patrón utilizando las Condiciones de Referencia de Cálculo (CRC).

Como conclusiones a los resultados de la demanda de calefacción obtenidos entre utilizar TRY sintético y reales se puede destacar:

- La dispersión para el clima considerado es función de la inercia térmica (relacionada directamente con el tamaño del edificio - factor de forma). Cuanto mayor es la superficie envolvente respecto al volumen calefactado (mayor factor de forma) menor es la inercia térmica y la variación aumenta.
- La dispersión es ligeramente creciente con la absorptancia exterior de los cerramientos del edificio para la configuración de ventanas descrita.

3.5.5. Localización y clima de las poblaciones analizadas en la validación

En este subapartado se facilitan los datos climáticos medios mensuales y la localización geográfica de las seis poblaciones analizadas, que son:

- Copenhague (Dinamarca)
- Leicester (Inglaterra)
- Bologna (Italia)
- y las españolas de Soria, Zaragoza y Málaga.

Las ciudades elegidas pretenden representar diferentes climas de nuestro contexto geográfico. Además se ha elegido alguna de ellas además por el conocimiento y análisis previo realizado en

un proyecto SAVE en el que participó el Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza. En este proyecto se trabajó con las poblaciones de Leicester, Bologna y Zaragoza.

La población de Copenhague fue seleccionada debido a que la aplicación de contraste TSBI3 ha sido desarrollada en esta población e incluye un TRY construido con datos reales a partir de 30 años de medición horaria de variables climáticas.

Los ficheros TRY de las poblaciones españolas se han generado aplicando la metodología de Bahadori M.N. et al (1986), siendo por lo tanto ficheros sintéticos.

Los datos de las poblaciones españolas han sido obtenidos del Instituto Nacional de Meteorología (www.inm.es). En esta fuente aparece como dato de radiación las horas de insolación mensual, habiendo sido tratados estos datos con el modelo de Gopinathan K.K. et al (1995) para insolación, obteniendo como resultado los datos de radiación global sobre horizontal. Para la localidad de Zaragoza se han utilizado los datos ya tratados de Turégano J.A. et al. (1994).

El Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza participó en el proyecto europeo Mes-Res (1999) sobre promoción del ahorro energético en el sector residencial. Dentro de las tareas del proyecto sus miembros debían tratar los datos meteorológicos de las poblaciones involucradas para simular edificios en aplicaciones dinámicas. Para ello los representantes de Bologna y Leicester facilitaron sus datos climáticos proporcionados por los Institutos Meteorológicos nacionales de cada uno los países, que son los que se han utilizado en la tesis para estas poblaciones. Para Bologna se parte de un fichero sintético y para Leicester existe un TRY confeccionado con datos climáticos horarios.

Los datos de Copenhague se incluyen en la aplicación danesa TSBI3, que es el fichero del Danish Test Reference generado para Copenhague (Andersen B. et al., 1982).

Los datos de localización y los parámetros climáticos medios mensuales de las poblaciones se recogen en las tablas 3.34 y 3.35.

Población	Latitud (º)	Longitud (º)
Bologna	45,5	11,4 E
Copenhague	55,4	12,2 E
Leicester	51,5	1,2 O
Málaga	36,4	5,3 E
Soria	41,5	2,7 O
Zaragoza	41,6	0,9 O

Tabla 3.34. Localización de las poblaciones en las que se han ubicado los edificios patrón.

Población		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Med. anual
Bologna	T	1,1	3,3	8,1	12,7	17,5	21,4	23,9	23,6	19,7	13,7	7,2	2,7	12,9
	R	1,3	2,1	3,1	4,8	6,1	6,8	6,9	5,9	4,5	2,8	1,7	1,1	3,9
Copenhague	T	-0,6	-1,1	2,6	6,6	10,6	15,7	16,4	16,7	13,7	9,2	5,0	1,7	8,0
	R	0,4	1,1	1,8	3,9	5,0	6,1	5,2	4,3	2,8	1,4	0,6	0,4	2,8
Leicester	T	4,4	4,1	6,5	9,1	12,9	15,5	15,5	16,4	13,1	9,4	8,7	4,9	10,0
	R	0,6	0,9	2,4	3,4	4,6	4,9	3,8	3,9	2,7	1,8	0,7	0,5	2,5
Málaga	T	12,2	12,8	14,0	15,8	18,7	22,1	24,7	25,3	23,1	19,1	15,2	12,6	18,0
	R	1,6	2,6	4,4	6,1	8,8	9,0	8,4	8,0	6,4	3,5	1,8	1,4	5,2
Soria	T	2,9	4,0	5,9	8,0	11,8	16,1	19,9	19,6	16,5	11,4	6,2	3,4	10,4
	R	1,5	2,2	3,4	4,6	6,0	7,0	7,4	6,4	4,4	2,8	1,7	1,3	4,0
Zaragoza	T	6,1	7,6	9,2	12,3	16,3	20,6	24,3	23,5	19,5	14,8	9,5	6,0	14,1
	R	2,0	3,1	4,5	5,8	6,9	7,8	8,2	7,3	5,4	3,9	2,5	1,6	4,9

Tabla 3.35. Datos medios mensuales de temperaturas y radiación global sobre horizontal de las poblaciones en las que se han ubicado los edificios patrón. El dato de temperatura (T) tiene unidades de °C y la radiación (R) kWh/m² día.

3.5.6. Importancia de la precisión de los modelos de conversión de la radiación solar. Análisis de las diferentes desviaciones posibles.

Los datos climáticos medios mensuales más importantes que caracterizan una población son los datos de la temperatura seca y de la radiación global sobre horizontal. A partir de éstos las aplicaciones de cálculo medio mensual pueden obtener la demanda de calefacción o refrigeración de un edificio.

En algunos lugares no existe el valor de la radiación debiéndose recurrir a modelos matemáticos que la obtengan a partir de la insolación, valor usualmente registrado, y que pueden conducir a grandes imprecisiones del valor de la radiación global sobre horizontal como indica Soler A. et al (1990).

Además, en las aplicaciones de cálculo del balance energético de edificios se puede incurrir en otro error al aplicar modelos de conversión de la radiación sobre horizontal a otras orientaciones e inclinaciones, por lo tanto no sólo el método aplicado en el balance tiene importancia también los modelos de conversión de la radiación pueden dar lugar a diferencias de cálculo.

En este apartado se ha abordado el análisis de la importancia de los errores en la determinación de la radiación, comparando éstos con los que se podría tener al existir una imprecisión en la medición de la temperatura ambiental.

Para llevar a cabo esta comparación se han utilizado dos métodos de cálculo similares como son el propuesto por la norma española UNE-EN-832 (2000), proveniente de los trabajos realizados en Europa a partir de la prEN-832, y el Método 5000.

En la citada norma se ha incluido un ejemplo de un edificio en el que se describen todos los datos que lo definen, ubicado en Lausana (Suiza). Este tipo de edificio es utilizado para realizar el test de validez entre diferentes aplicaciones de cálculo o modelos.

A continuación se detalla la comparación entre el Método 5000 y la norma UNE-EN-832, los resultados obtenidos para el edificio ejemplo son similares para ambas aplicaciones.

En la aplicación Meteo (2000), basada en el Método 5000, se han introducido las características del edificio ejemplo incluido en la norma UNE-EN-832, de tal modo que el modelo resultante fuera lo más similar posible en ambos métodos. Las características de este edificio quedan recogidas en la tabla 3.36.

Apartado	Datos
Localización	Lausana (Suiza)
Cerramientos	Aislamiento exterior del edificio Techo de madera con tejas cerámicas, $U = 0.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ Paredes de ladrillo, $U = 0.3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ Ningún puente térmico destacable Solera con aislamiento, resistencia térmica = $2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ Los acristalamientos de la vivienda son de doble vidrio ($U=2 \text{ W/mK}$) y presentan un 20% de marcos de madera
Captación solar	No se utilizan cortinas ni sombras exteriores
Renovación de aire	Superficie calefactada = 99 m^2 El volumen calefactado = 255 m^3 La renovación previsible es de 0.5 l/h Temperatura interior de confort 20°C
Temperatura termostática	
Inercia del edificio	La capacidad térmica del edificio indicada en el ejemplo de la norma es de 36 MJ/K , siendo la constante de tiempo de $\tau (\text{h}) = 55 \text{ h}$ La equivalencia en Meteo es de 352 kg/m^2 , (considerando el calor específico medio de los materiales constructivos de 900 J/kg K , (fuente: Ministerio Fomento 2002))
Ganancias internas	Se estiman 250 W
Sistema auxiliar	Rendimiento del sistema de calefacción = 75%

Tabla 3.36. Resumen de los datos del edificio ejemplo de la norma UNE-EN-832 (2000) que permitirán comparar el balance energético obtenido con la aplicación Meteo (2000). (Fuente: UNE-EN-832, 2000).

En la figura 3.31 se muestra las dimensiones del edificio a modelar.

Un dato muy importante en los modelos es el clima asociado a la localidad analizada. En la tabla 3.38 se incluye el clima de Lausana facilitado en la norma.

En Meteo (2000) se han introducido los valores de temperatura media mensual y la radiación global sobre horizontal media mensual. A partir de la radiación global sobre horizontal, Meteo (2000) genera la radiación sobre cualquier fachada con cualquier orientación e inclinación. El cálculo de la radiación utilizado es el propuesto por Bernad R. et al (1982).

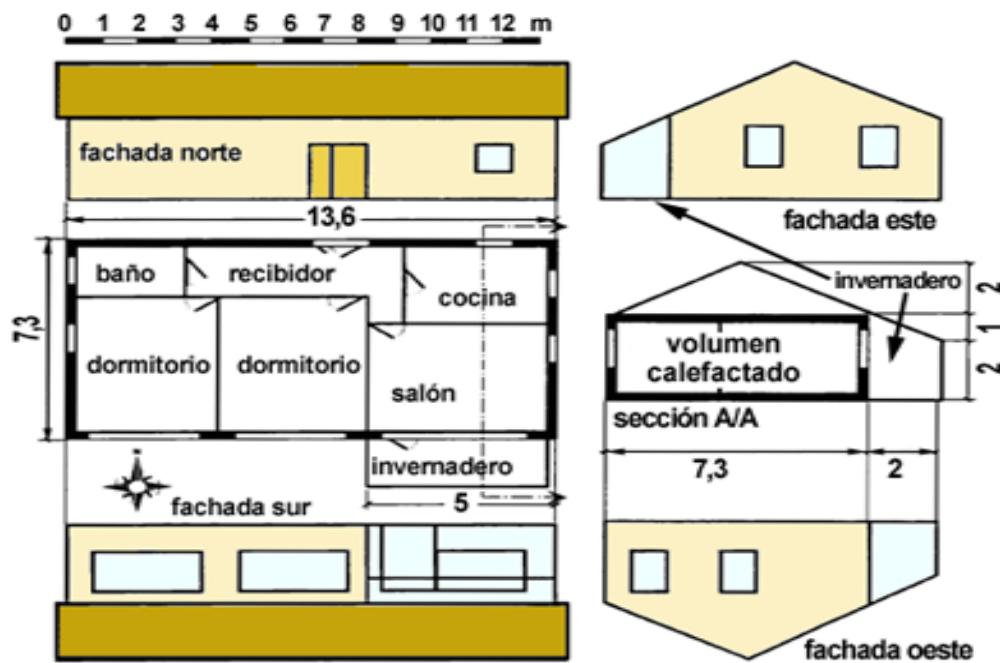


Figura 3.31. Plano del edificio ejemplo incluido en la normativa UNE-EN-832 (2000).
(Fuente: UNE-EN-832, 2000)

Mes	Temperatura media (°C)	Radiación solar global (kWh/m ² /día) sobre una superficie orientada al				
		Horizontal	Sur	Este	Oeste	Norte
Enero	0,0	1,0	1,6	0,6	0,7	0,3
Febrero	1,9	1,9	2,4	1,1	1,2	0,5
Marzo	5,6	3,0	2,9	1,7	1,7	0,8
Abril	9,3	5,5	3,1	2,4	2,5	1,1
Mayo	13,0	5,2	2,8	2,8	2,7	1,5
Junio	16,7	6,1	2,9	3,2	3,1	1,7
Julio	18,8	6,3	3,1	3,2	3,2	1,6
Agosto	17,6	5,0	3,2	2,7	2,7	1,1
Septiembre	15,1	3,8	3,4	2,1	2,2	0,9
Octubre	10,8	2,3	2,8	1,3	1,4	0,6
Noviembre	5,1	1,2	1,9	0,7	0,8	0,4
Diciembre	0,3	0,9	1,6	0,6	0,6	0,3

Tabla 3.37. Datos climáticos de Lausana (Suiza) facilitados en la norma UNE-EN-832 (2000). (Fuente: UNE-EN-832, 2000).

<i>Radiación solar global (kWh/m² día) sobre una superficie orientada al</i>				
Mes	Horizontal	Sur	Este y Oeste	Norte
Enero	1,0	2,1	0,7	0,3
Febrero	1,9	3,0	1,2	0,4
Marzo	3,0	3,4	1,9	0,6
Abril	5,5	3,3	2,6	0,9
Mayo	5,2	2,6	2,9	1,2
Junio	6,1	2,5	3,3	1,6
Julio	6,3	2,8	3,4	1,5
Agosto	5,0	3,0	2,9	1,0
Septiembre	3,8	3,6	2,3	0,7
Octubre	2,3	3,3	1,5	0,5
Noviembre	1,2	2,3	0,8	0,3
Diciembre	0,9	1,9	0,6	0,2

Tabla 3.38. Datos de radiación facilitados por el modelo de Meteo (2000) basado en las correlaciones de Bernad R. et al (1982).

La radiación global sobre las diferentes fachadas comparando ambos cálculos difieren, siendo mayores los valores obtenidos mediante el modelo de Bernad R. et al (1982) para todas las orientaciones salvo para la fachada norte. La variación porcentual y la diferencia de la radiación global en el periodo invernal, (desde enero hasta abril y desde octubre a diciembre), queda reflejada en la tabla 3.39.

<i>Radiación solar global sobre una superficie orientada al</i>				
Conceptos	Sur	Este	Oeste	Norte
Rad. Global media invernal UNE-EN-832 (kWh/m ² día)	2,33	1,20	1,27	0,57
Rad. Global media invernal METEO (kWh/m ² día)	2,75	1,33	1,33	0,46
Diferencia rad. global media invernal entre ambos métodos (kWh/m ² día)	0,43	0,13	0,06	- 0,11
Porcentaje variación rad. global media invernal (Meteo frente a UNE-EN-832)	15,5%	9,7%	5,4%	-25,0%

Tabla 3.39. Variaciones de radiación global media invernal sobre diferentes fachadas según el ejemplo de la UNE-EN-832 y Meteo (2000) basado en las correlaciones de Bernad R. et al (1982).

La variación máxima de radiación global media aparece en la fachada sur (0,43 kWh/m² día) con una diferencia de un 15,5%, mientras que para la fachada norte aunque la diferencia porcentual es mayor (-25%) en valor absoluto la diferencia de la radiación es menor (0,11 kWh/m² día).

A priori cabría esperar que la radiación provocase menores demandas en el modelo introducido en Meteo (2000) y que éste fuera un valor con desviaciones comprendidas entre un 15,5% y un 5,4%. Sin embargo, la diferencia de demanda de calefacción se reduce debido al término de aprovechamiento solar máximo que tienen ambos métodos y que hace igualar prácticamente la captación útil, como pormenoriza la tabla 3.40.

Esta tabla recoge para ambos métodos los valores mensuales de las pérdidas totales por transmisión e infiltración y las ganancias solares e internas máximas y útiles. También muestra los valores anuales para cada concepto y las diferencias porcentuales obtenidas.

<i>Pérdidas y ganancias (kWh/mes)</i>						
	Método UNE-EN-832			Meteo (Método 5000)		
Mes	Pérdidas	Ganancia máxima	Ganancia útil	Pérdidas	Ganancia máxima	Ganancia útil
Enero	2611	611	610	2549	707	689
Febrero	2134	770	773	2083	874	832
Marzo	2010	1030	1010	1963	1160	1067
Abril	1352	1160	1018	1320	1197	994
Mayo	914	1186	914	892	1164	704
Junio						
Julio						
Agosto						
Septiembre						
Octubre	1201	964	868	1173	1079	890
Noviembre	1882	659	660	1838	741	707
Diciembre	2571	600	599	2511	654	640
Suma anual	14676	6982	6454	14330	7577	6524
Diferencia Meteo y UNE-EN-832				-2.4%	7.8%	1.1%
Demanda calefacción y diferencia				14676-6454 = 8222	14330-6524 = 7805	
Meteo-UNE-EN-832						5,1%

Tabla 3.40. Comparación de resultados (pérdidas y captación solar) obtenidas para el modelo ejemplo de la norma UNE-EN-832 frente al realizado con Meteo (2000).

La demanda de calefacción en los métodos simplificados se obtiene al sustraer a las pérdidas las ganancias útiles. Si se aplica este criterio en la tabla 3.40 se obtiene que la demanda de calefacción para el ejemplo de la norma es de 8222 kWh/año y para el modelo de Meteo (2000) es de 7805 kWh/año. La diferencia de demanda de calefacción obtenida es de tan sólo un 5,1%, menor a la que parecería deducirse de la variación en la radiación global sobre las fachadas. Esta diferencia es consecuencia, fundamentalmente, de las diferencias en el cálculo de las pérdidas.

Como se muestra en la tabla 3.40, la variación de la ganancia máxima, un 7,8%, es debida al diferente cálculo estimado de radiación solar sobre los acristalamientos con ambos métodos. Sin embargo, al aplicar el concepto de minoración de la ganancia debido a la limitación de la inercia térmica la diferencia que existe en la ganancia se reduce a un 1,1% (ganancia útil). Este efecto se debe a que los métodos utilizan el factor de aprovechamiento de la ganancia, anteriormente comentado en la descripción de métodos del capítulo, que no contabiliza como útil los excesos de radiación al tener en cuenta la inercia térmica del edificio y su potencial como aprovechamiento de la ganancia solar.

Con los resultados anteriores se verifica la similitud de cálculo de los métodos UNE-EN-832 (2000) y Método 5000 (Claux P. et al 1982) implementado en la aplicación Meteo (2000). Para el ejemplo propuesto la diferencia de las pérdidas por transmisión e infiltración se sitúa en un 2,4%, la diferencia de la ganancia útil en un 1,1% y la diferencia en la demanda de calefacción en un 5,1%. Todo estas diferencias son equivalentes a las de los métodos detallados si trabajamos con un TRY real o uno sintético, y todas ellas son claramente inferiores a las potenciales desviaciones (20% y superiores) en función del responsable del cálculo y del programa utilizado.

Por otra parte, en el balance energético de un edificio con los métodos simplificados, los parámetros climáticos que modifican la demanda son la temperatura media mensual y la radiación global incidente sobre las diferentes fachadas obtenida del valor de la radiación global medio mensual sobre horizontal.

Una variación en la temperatura provocará mayores modificaciones en la demanda que una variación en la radiación. Para comprobar esta afirmación se ha partido del modelo de Meteo (2000) del edificio ejemplo de Lausana y se le ha sometido a variaciones climáticas, en concreto se ha modificado la radiación global sobre horizontal entre un $\pm 10\%$.

Para la temperatura no basta con aplicar un porcentaje de reducción o aumento a ésta. Por ejemplo, cuando se tienen 0°C ¹⁰ y se le aplica una reducción de un 10% su temperatura sigue siendo de 0°C , para salvar esta dificultad hay que fijarse en la ecuación del balance de pérdidas del edificio.

La energía perdida en un día ($Q_{perdida}$) se calcula a partir de la temperatura termostática ($T_{termostato}$) de confort, la temperatura exterior (T_{ext}) y el coeficiente total de pérdidas del edificio [3.20].

$$Q_{perdida} = \frac{24 \times P_{total} \times (T_{termostato} - T_{ext})}{1000} \quad (\text{kWh/día}) \quad [3.20]$$

Al modificar el porcentaje de radiación se aplica directamente este porcentaje de cambio a la ganancia solar. Para que existiera esta relación directa en las pérdidas del edificio no bastaría con modificar la temperatura exterior, habría que aplicar este cambio a la diferencia de temperatura entre la termostática y la exterior.

¹⁰ La sustitución de la temperatura Celsius por su valor como temperatura absoluta no es apropiado en este caso, dado el uso determinado por la expresión 3.36. Se ha considerado más oportuno un cálculo de la desviación porcentual a partir de la diferencia ($T_{termostato} - T_{ext}$) que supone incorporar la imprecisión en el propio sensor. Esto hace más realista la posibilidad de variaciones de un 10% (equivalente a 2°C en el caso considerado) que sería menos probable como error imputable sólo a la media estadística de T_{ext} .

La nueva temperatura exterior ($T_{ext_corregida}$) al aplicarle un incremento o decremento porcentual (Porc) se obtendría con la ecuación:

$$T_{ext_corregida} = T_{ext} + (T_{termostato} - T_{ext}) \times \frac{Porc}{100} \quad (\text{°C}) \quad [3.21]$$

Sobre esta temperatura se han realizado variaciones entre un $\pm 10\%$ en el modelo de Meteo (2000). En la tabla 3.41 se incluyen los resultados de temperatura y radiación iniciales de referencia y el resto de valores para los porcentajes de cálculo.

Los resultados obtenidos de la demanda de calefacción para todo el rango de variaciones en temperatura y radiación para el edificio unifamiliar modelado bajo las Condiciones de Referencia de Cálculo (CRC) se muestra en la tabla 3.42.

Mes	<i>Temp. inicial (°C)</i>	<i>Rad. Global inicial (kWh/m² día)</i>	-10%		-5%		5%		10%	
			Temp	Rad,	Temp	Rad,	Temp	Rad,	Temp	Rad,
Enero	0,0	1,0	-2,0	0,9	-1,0	1,0	1,0	1,1	2,0	1,1
Febrero	1,9	1,9	0,1	1,7	1,0	1,8	2,8	2,0	3,7	2,1
Marzo	5,6	3,0	3,1	2,7	3,8	2,9	5,4	3,2	6,1	3,3
Abril	9,3	5,5	8,2	4,1	8,8	4,3	9,8	4,7	10,4	5,0
Mayo	13,0	5,2	12,3	4,7	12,7	4,9	13,4	5,5	13,7	5,7
Junio	16,7	6,1	16,4	5,5	16,5	5,8	16,9	6,4	17,0	6,7
Julio	18,8	6,3	18,7	5,7	18,7	6,0	18,9	6,6	18,9	6,9
Agosto	17,6	5,0	17,4	4,5	17,5	4,8	17,7	5,3	17,8	5,5
Septiembre	15,1	3,8	14,6	3,4	14,9	3,6	15,3	4,0	15,6	4,2
Octubre	10,8	2,3	9,9	2,1	10,3	2,2	11,3	2,4	11,7	2,5
Noviembre	5,1	1,2	3,6	1,1	4,4	1,1	5,8	1,3	6,6	1,3
Diciembre	0,3	0,9	-1,7	0,8	-0,7	0,9	1,3	0,9	2,3	1,0

Tabla 3.41. Cuadro de variaciones en los datos climáticos a introducir en la simulación con la aplicación Meteo (2000) del edificio ejemplo de la UNE-EN-832 (2000) localizado en Lausana para analizar diferentes tendencias sometido a las CRC.

Demanda calefacción (kWh/año)		Variación Radiación Global				
		-10%	-5%	0%	5%	10%
Variación Temperatura	-10%	9417,8	9169,8	9042,7	8795,8	8639,1
	-5%	8765,6	8526,8	8416,0	8185,3	8045,2
	0%	8126,2	7899,3	7805,5	7591,5	7222,2
	5%	7503,6	7292,6	7225,1	6770,7	6629,5
	10%	6899,9	6706,2	6407,0	6181,5	6055,2

Tabla 3.42. Demanda de calefacción (kWh/año) del edificio ejemplo de la UNE-EN-832 (2000) localizado en Lausana para diferentes variaciones de radiación global sobre horizontal y de temperatura exterior modelado en la aplicación Meteo (2000) sometido a las CRC.

Porcentaje variación demanda calefacción anual		Variación Radiación Global				
		-10%	-5%	0%	5%	10%
Variación Temperatura	-10%	20,7%	17,5%	15,9%	12,7%	10,7%
	-5%	12,3%	9,2%	7,8%	4,9%	3,1%
	0%	4,1%	1,2%	0,0%	-2,7%	-7,5%
	5%	-3,9%	-6,6%	-7,4%	-13,3%	-15,1%
	10%	-11,6%	-14,1%	-17,9%	-20,8%	-22,4%

Tabla 3.43. Porcentaje de variación de demanda de calefacción (kWh/año) del edificio ejemplo de la UNE-EN-832 (2000) localizado en Lausana para diferentes variaciones de radiación global sobre horizontal y de temperatura exterior modelado en la aplicación Meteo (2000) sometido a las CRC. La demanda de referencia corresponde al caso en que no existe variación ni de temperatura ni de radiación.

De los cálculos realizados se comprueba, en la tabla 3.43, que las variaciones de temperatura ocasionan mayores fluctuaciones de demanda que las provocadas por la radiación. Variando¹¹ la temperatura ($\pm 10\%$) se puede llegar a diferencias entre un 15,9% y un -17,9%, mientras que las variaciones en radiación ($\pm 10\%$) modifican la demanda entre un 4,1% y un -7,5%. Se puede decir que, prácticamente, la influencia de la temperatura exterior puede producir el triple de desviación en la estimación de la demanda que las variaciones en radiación.

Del resultado obtenido se concluye que es más importante para caracterizar un clima una buena estimación de las temperaturas que lo representan frente a la desviación en la radiación.

No es descabellado encontrar fuentes bibliográficas con fuertes desviaciones de los datos meteorológicos, por ejemplo, para el caso de Pamplona existen diferencias de la radiación global media anual de un 16,8% y de un 10,7% respecto a los datos meteorológicos más actuales, según se recoge en Hernández M.A. (2005), las fuentes que presentan estas dispersiones son el Miner (1981) y los datos de Censolar et al (2002). Si se utilizarán estos últimos valores de radiación se estaría obteniendo una demanda superior del edificio.

El autor en la recopilación de datos climáticos realizada para el libro antes mencionado, se ha encontrado con datos sorprendentes, que han sido medidos por los institutos meteorológicos y que son los datos que se facilitan para las localidades.

En concreto, el caso más curioso es el de Agoncillo, en La Rioja, que desde enero de 2001 está registrando una radiación media dos veces inferior a la lógica entre los meses de enero a marzo y de septiembre a diciembre. Este hecho está probablemente causado por la colocación de un obstáculo delante del piranómetro que da sombra en el periodo anual con anomalías. También es de destacar que la temperatura media exterior medida en Tudela es menor a la registrada en Pamplona desde mayo a octubre.

Con estas incertidumbres climáticas, si se tuvieran los valores máximos de variaciones de la tabla 3.43 se podría estar cometiendo un error en la estimación de la demanda de calefacción entre un 20,7% y un -22,4%.

¹¹ En el sentido señalado más arriba de variación en la diferencia Tamb y T termostato

En el apartado 3.5.1, se indicaba que las desviaciones de cálculo que plantea la UNE-EN-832 (2000) están acotadas al 20% para diferentes usuarios que utilizan idéntico clima y método. Bajo esta circunstancia se comprueba cómo las variaciones climáticas pueden conducir a variaciones máximas similares. Si consideramos que el uso de un TRY real o sintético puede suponer errores hasta un 5%, que la desviación entre modelo simplificados y dinámicos es también de ese orden y que el usuario puede introducir incertidumbres mayores a todas las anteriores sumadas, puede señalarse que un método de cálculo que suponga desviaciones respecto del modelo ideal dinámico en un orden de magnitud comparable a los valores anteriores y suponga una reducción en tiempos de cálculo y eficacia en el planteamiento gráfico para la optimización de la demanda de un conjunto urbanístico, será un modelo idóneo en relación con el objetivo de esta tesis. Este es el análisis que se desarrolla a lo largo del apartado siguiente.

En la figura 3.32 se ha representado gráficamente los resultados de la demanda de calefacción de la tabla 3.43, verificándose la mayor inclinación de la superficie en la dirección de cambios de la temperatura.

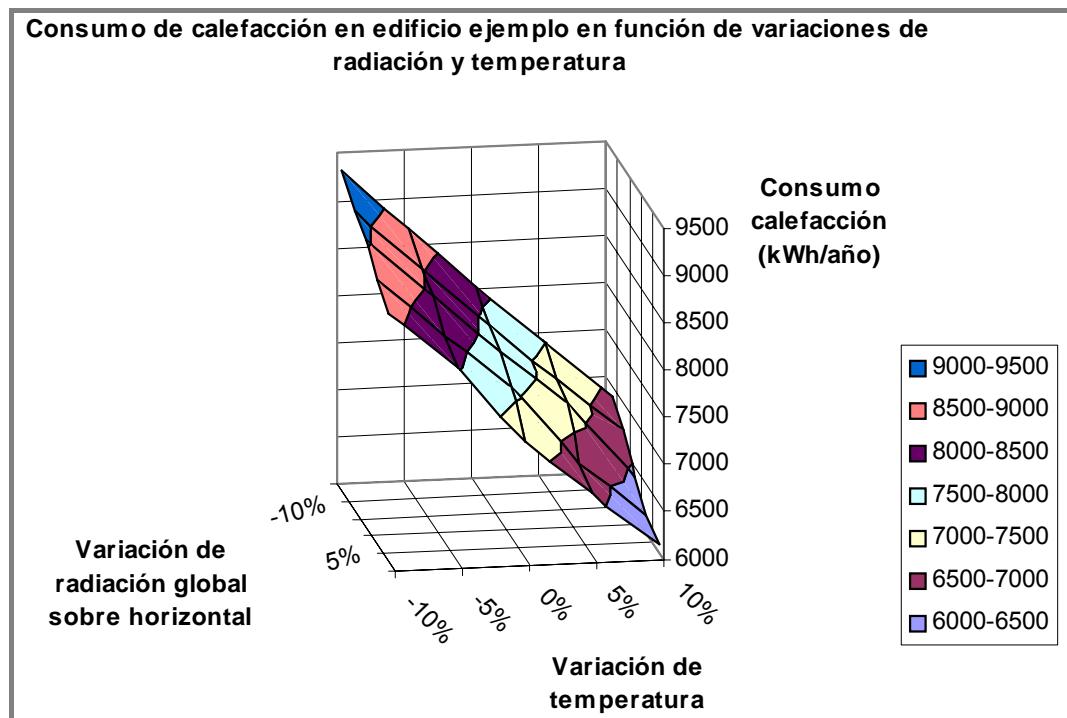


Figura 3.32. Demanda de calefacción (kWh/año) para diferentes variaciones de radiación global sobre horizontal y de temperatura exterior calculado para el ejemplo del edificio en Lausana con el modelo de Meteo (2000). (Elaboración propia).

Como conclusión de este subapartado, se ha verificado que puede afectar más al cálculo de la demanda la imprecisión en la temperatura exterior que una imprecisión similar en la radiación global o que la elección del modelo de radiación.

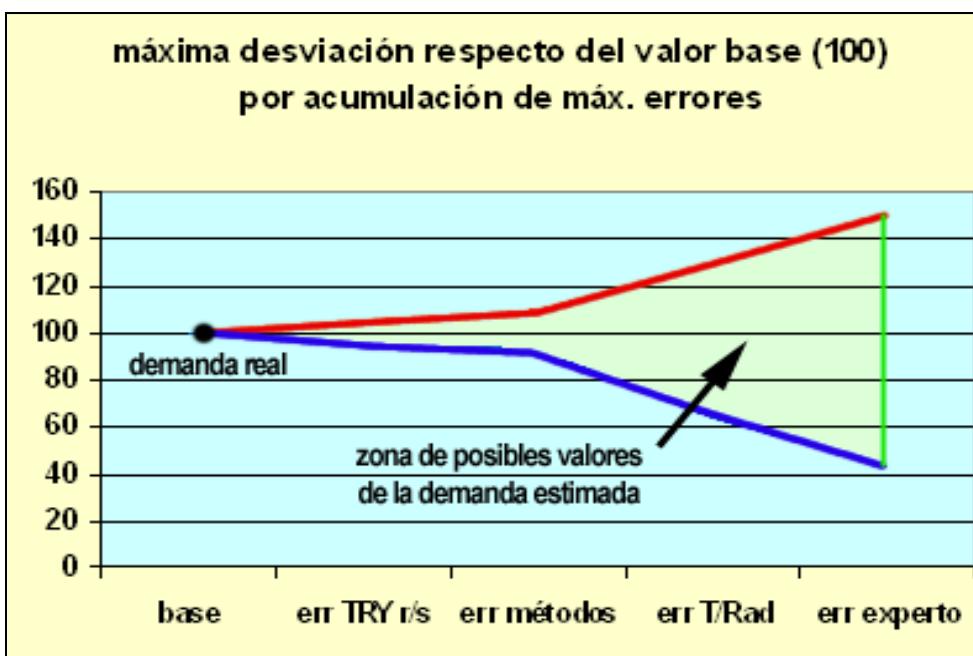


Figura 3.33. Desviaciones máximas estimadas en función de la agregación de errores.

Como conclusión de este análisis, destacar el significativo porcentaje de error que puede suponer la acumulación aleatoria de errores metodológicos y de información en una simulación con un método al margen de la perfección de éste. En este sentido, supuesto perfecto el método que utilizaremos (TSBI3) para la validación de la propuesta de la tesis, las desviaciones de la propuesta deberán ser de un rango inferior a las que puedan provocar los errores acumulados (excluido el relativo al experto pues ni éste ni los criterios que aplica varían de uno a otro método), pudiéndose considerar así una fuente más de error aleatorio dentro de la incertidumbre intrínseca a la simulación (datos climáticos, etc).

3.6. Análisis de resultados y validación del método propuesto

Para completar la metodología de validación propuesta en la figura 3.11 es necesario realizar el contraste de resultados de las múltiples modelaciones obtenidos con el método de cálculo que se propone y la aplicación dinámica de contraste TSBI3.

Para poder comparar diferentes métodos deben minimizarse los errores internos, de tal modo que los dos modelos tengan similares áreas de cerramientos, coeficientes de conducción, factores climáticos, etc.

Garantizando la similitud se podrán obtener conclusiones sobre la validez de los cálculos que realizan diferentes métodos pues el único error será el intrínseco al modelo y no el aporte a los errores considerados en el apartado anterior.

La eliminación de errores internos es el primer nivel de análisis según Lomas K.J. (1990). Una vez comprobado un bajo nivel de errores internos se debe proseguir con la validación de los métodos utilizando métodos de comparación diferencial o el Método Monte Carlo. En este caso se han utilizado métodos de comparación para reducir los errores internos de los modelos.

En los siguientes apartados se muestran los diferentes análisis realizados para validar los métodos propuestos de calefacción y refrigeración, planteando las posibles modificaciones que se proponen para aumentar la precisión de los métodos simplificados.

3.6.1. Efectos de la inercia térmica y modificación de su cálculo en el Método 5000

Al utilizar el Método 5000 aparece un inconveniente que se puede solventar si se tiene una larga experiencia en herramientas de simulación. Este problema surge al poder zonificar el edificio de diferentes maneras: el usuario puede comprobar cómo para un edificio modelado se pueden obtener demandas de calefacción muy dispares, en algunos casos, dependiendo de las características del edificio o del clima, según la zonificación adoptada.

Esta desviación de resultados tiene que ver con la asignación de diferentes inercias del edificio, dando lugar a diferentes aproximaciones de la ganancia solar útil, que redunda directamente en la demanda final de calefacción del edificio.

Si se quiere obtener un método simplificado válido, como el que pretende esta tesis, que se plasme en una aplicación informática de fácil manejo y que requiera poca experiencia del usuario final, no se puede permitir que la definición del edificio permita variantes que conduzcan a resultados dispares. En un cierto sentido el problema es artificial puesto que en el nivel de actuación que propone la tesis no se toma en consideración un análisis detallado del edificio puesto que este objetivo corresponde al nivel siguiente de actuación. Sin embargo para evitar aparentes inconsistencias y, sobre todo, para garantizar que las condiciones de aplicación del modelo propuesto y del modelo que se utiliza para validarla sean equivalentes o idénticas, es pertinente resolver este punto sin ambigüedad.

Así, en este apartado se plantea cómo salvar este inconveniente, estudiando la influencia de la inercia térmica del edificio y proponiendo una modificación al Método 5000. Se consigue así que el método propuesto proporcione un cálculo indicativo y orientativo de la demanda de calefacción de un edificio al margen del grado de entrenamiento y conocimiento del usuario que utilizará la futura herramienta informática.

Los métodos simplificados presentan una corrección de la ganancia solar útil en función de la inercia del edificio. Ésta representa la capacidad térmica que tiene el edificio. Cuanta más inercia tenga el edificio más captación solar se podrá aprovechar sin sobrecalentamientos en las estancias, o en el caso de calefacción intermitente cuando ésta se apaga la temperatura interior de la vivienda desciende más lentamente a lo largo de la noche.

Givoni B. (1991) analizó la capacidad útil de aprovechamiento solar que tiene un edificio en relación con su inercia térmica. Hay que tener en cuenta que el exceso de acristalamiento no conduce a mayores ahorros energéticos ya que se producen situaciones incómodas de sobrecalentamientos debiendo recurrir a la ventilación y/o balances globales negativos.

En la figura 3.34 se muestra el efecto combinado de la inercia y el aislamiento de un edificio respecto al porcentaje de acristalamiento en la fachada sur. El coeficiente BLC representa el coeficiente global de pérdidas del edificio por grado de temperatura (Wh/K día) y DHC ($\text{Wh/m}^2 \text{ día}$) es la energía que es capaz de almacenar el edificio por unidad de superficie durante el día y devolverla por la noche (figura 3.34)

Las curvas de la figura 3.34 muestran 4 casos diferentes en los que se ha combinado un mal coeficiente de pérdidas con la mayor capacidad (caso 1), con la menor capacidad (caso 2) y un edificio mejor aislado con capacidad alta (caso 3) y baja (caso 4).

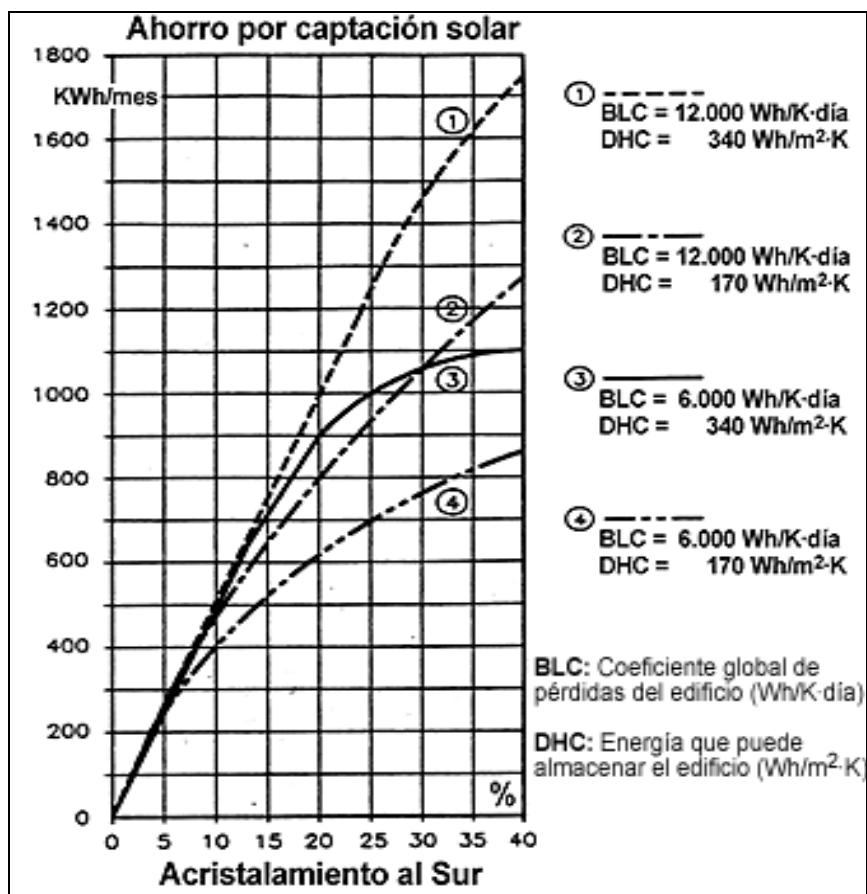


Figura 3.34. Ahorro solar útil frente al porcentaje de acristalamiento en una fachada sur con 4 tipos de edificio diferenciados por su aislamiento y su inercia térmica. El coeficiente BLC representa el coeficiente global de pérdidas del edificio por grado de temperatura y día (Wh/K·día) y DHC (Wh/m²·día) es la energía que es capaz de almacenar el edificio por unidad de superficie durante el día y devolverla por la noche. (Fuente: Givoni B., 1991).

En los edificios con mayor aislamiento (caso 3 y 4), si se aumenta el área del acristalamiento la ganancia solar útil tiende a saturarse de forma más significativa respecto a los casos de menos aislamiento, como podría esperarse. Del mismo modo, esta ganancia útil se incrementa al aumentar la capacidad de almacenamiento, es decir, su inercia térmica.

Conviene, pues, utilizar un procedimiento sólido para asignar la inercia térmica a un determinado edificio. Para ello se debe proceder a determinar primero la capacidad térmica de cada cerramiento (C) que es la energía que puede contener el cerramiento por grado de temperatura.

$$C = \sum_{i=1}^m v_i \times \rho_i \times c_i \quad (\text{J/m}^2 \text{ K}) \quad [3.22]$$

El sumatorio se extiende para todas las capas paralelas de material que conforman el cerramiento

v_i : volumen de material por unidad de superficie del cerramiento (m^3/m^2)

ρ_i : densidad material (kg/m^3)

c_i : calor específico del material (J/kg K)

La capacidad térmica, o capacidad calorífica, es para cada material función del volumen, de la densidad y del calor específico. En un cerramiento cuando absorbe energía se incrementa su temperatura. El ritmo y cuantía del incremento de temperatura, para una misma cantidad de energía absorbida, decrece con el aumento de la capacidad.

La mayor parte de los materiales de construcción tienen un calor específico comprendido entre 800 y 850 J/kg K , mientras que la densidad puede variar entre 15 y 2600 kg/m^3 presentando un amplio rango de variación. Por este motivo la capacidad térmica podemos relacionarla directamente con el peso del cerramiento, siendo un indicativo bastante preciso.

Si se analiza un cerramiento bajo condiciones estáticas la capacidad térmica no afecta a la variación de las pérdidas por conducción.

Para una habitación que se mantiene a temperatura constante a lo largo de un día, según Demirbilek F.N. et al (1996), a través de un cerramiento en contacto con la habitación con alta capacidad térmica se producen retrasos del flujo energético y una reducción en su amplitud a lo largo del día. Si se utilizan diferentes cerramientos con idéntico coeficiente de conducción y diferentes capacidades térmicas la demanda de energía diaria permanecerá constante.

Bajo las hipótesis de temperatura interior constante e idéntico coeficientes de conducción, el estudio de la temperatura superficial interior (figura 3.35) y del flujo de energía (figura 3.36) a través de un cerramiento puede incidir en un diseño más eficiente de la potencia del sistema auxiliar ya que este debe suministrar la potencia máxima que será diferente en función de la capacidad térmica de los cerramientos.

La potencia del sistema auxiliar se determina para una temperatura exterior mínima según indica el Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE, 1998), sin embargo, teniendo en cuenta la modificación de las pérdidas máximas en función del tipo de cerramiento se podría modificar la temperatura de diseño mínima aumentándose hasta en 4°C (Demirbilek F.N. et al, 1996).

La normativa DIN 4701 incorpora esta corrección fijando el aumento en 0°C para cerramientos de menos de 600 kg/m^2 , 2°C cuando la masa se sitúa entre 600-1400 kg/m^2 y 4°C cuando supera los 1400 kg/m^2 .

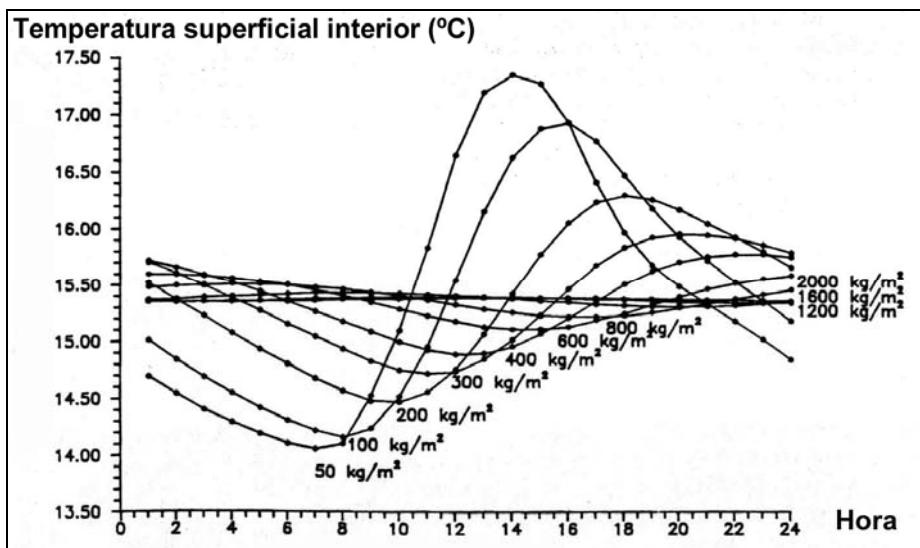


Figura 3.35. Variación de la temperatura superficial de la cara interior de diferentes cerramiento que separan un ambiente calefactado del exterior. Los cerramientos analizados cuentan con diferentes capacidades térmicas e idéntica conductancia. En el espacio calefactado se mantiene una temperatura constante, mientras que en el exterior se produce una variación climática horaria. (Fuente: Demirbilek F.N. et al, 1996).

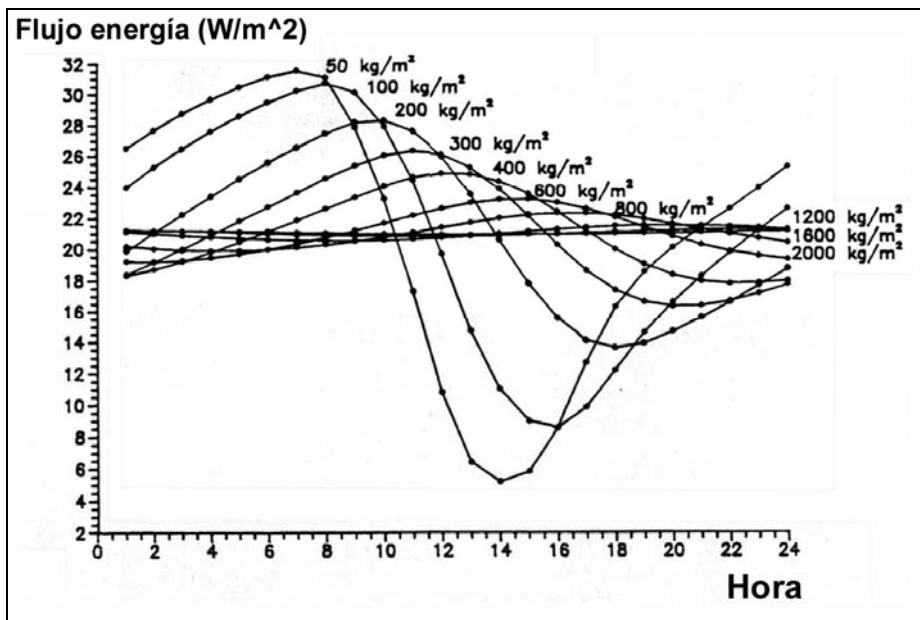


Figura 3.36. Variación del flujo de calor a través de un cerramiento en contacto con una habitación a temperatura constante para diferentes capacidades térmicas e idéntico coeficiente de conducción del muro. En todos los casos la demanda de energía diaria se mantiene prácticamente constante. (Fuente: Demirbilek F.N. et al, 1996).

Los análisis anteriores han sido obtenidos por modelación con el método del Factor de Respuesta. Experimentalmente se han contrastado estos resultados con dos células laboratorio del Centro Politécnico Superior de Zaragoza pertenecientes al Grupo de Energía y Edificación, que han sido construidas con dos muros en su fachada sur con un 33% de diferencia en su coeficiente de conducción y con un alto grado de aislamiento en sus cinco caras restantes.

Los muros analizados tienen diferentes capacidades térmicas, uno de ellos es un cerramiento de bloques de termoarcilla de 29 cm de espesor, y el otro está conformado por un tabique de doble hoja con 4 cm de poliestireno expandido (tipo II) separando ambas hojas.

Las células poseen equipos de calefacción y refrigeración independientes controlados mediante una programación termostática horaria. El sistema de monitorización implementado ha registrado cada diez minutos los consumos energéticos y las temperaturas alcanzadas en el interior así como las temperaturas a diferentes profundidades en los muros.

En el informe técnico del Grupo de Energía y Edificación (2002) se incluyen las características de esta instalación con una descripción de los datos que se registran, así como de los diferentes ensayos que se realizaron para caracterizar térmicamente los cerramientos.

En una de las diversas pruebas realizadas se mantuvieron las temperaturas interiores de las células a 25°C durante 13 días de marzo con una temperatura media ambiental de 11,5°C. Se comprobó que la demanda total de calefacción permaneció prácticamente constante debido a una desigualdad de aislamiento entre las dos células (difieren en sólo un 0,17%), pero en la célula con el cerramiento de menor capacidad térmica (doble hoja) la potencia máxima requerida era un 17,1% mayor. Estos resultados experimentales corroboran el análisis realizado por Demirbilek F.N. et al (1996).

En la tabla siguiente se muestran los resultados de consumo, la temperatura media y la potencia máxima requerida para ambas células.

Célula analizada	Consumo calefacción (Wh)	% mayor consumo	Temperatura media (°C)	Potencia máxima (W)
Con muro Doble hoja	37352	0,17	25,4	350
Con muro Termoarcilla	37288		25,4	290

Tabla 3.44. Resultados experimentales obtenidos en las células laboratorio entre los días 1 a 13 de marzo de 2001. El ensayo consistió en mantener 25°C en su interior.

En la figura 3.37 se verifica para los 13 días de análisis cómo la potencia máxima requerida en la célula de termoarcilla es inferior, a pesar de ser un 33% más conductor el muro de termoarcilla, existiendo un desfase. Además la amplitud de la potencia para todos los días es menor en el caso del muro de mayor capacidad térmica (termoarcilla).

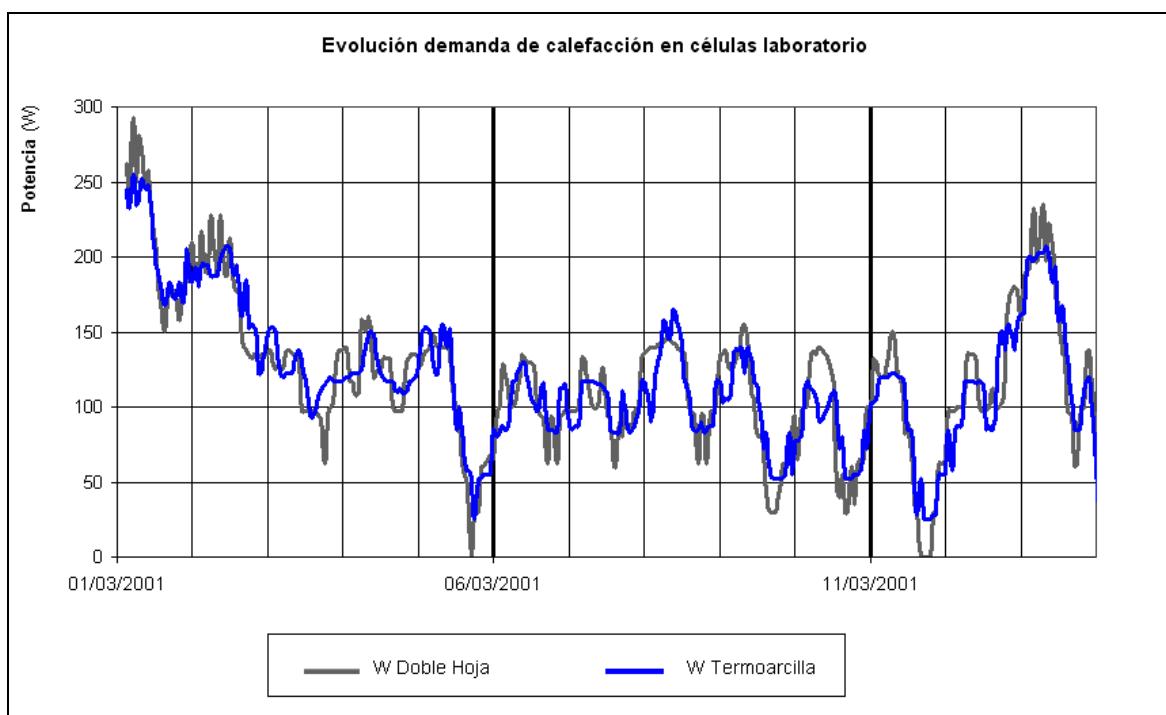


Figura 3.37. Evolución de la demanda de calefacción con calefacción continua manteniendo 25°C en el interior de las dos células laboratorio. La amplitud y la potencia máxima son menores para la célula con muro de termoarcilla (W Termoarcilla) frente a la de doble hoja (W Doble Hoja). (Fuente: GEE).

Cuando se utiliza calefacción intermitente la demanda de calefacción aumenta en la célula de termoarcilla por su menor grado de aislamiento, mientras que la potencia máxima sigue dándose en la de menor capacidad.

El beneficio de la alta inercia aparece cuando se produce el apagado del sistema auxiliar, produciéndose bajadas de temperatura más suaves en la célula de termoarcilla, ya que el muro es capaz de ceder al interior mayor cantidad de energía, la cual ha sido acumulada a lo largo del periodo de encendido de la calefacción.

En la época invernal los sistemas de calefacción calientan las capas de los cerramientos que se encuentran entre la superficie interna y el aislamiento. Estas capas permanecen a mayor temperatura que el resto y cuando se apaga la calefacción la energía acumulada por éstas es cedida a las estancias en contacto con el muro.

No toda la energía acumulada es cedida al interior, ya que en el cerramiento siguen existiendo pérdidas por conducción al ambiente exterior.

En las células, el muro de doble hoja es de inferior acumulación porque hasta llegar al aislante sólo existe como masa útil un ladrillo hueco de 4cm de espesor, sin embargo, el cerramiento de termoarcilla al no contar con aislamiento dispone de mayor masa de acumulación.

Para comprobar el efecto de la inercia con la calefacción intermitente se realizó un ensayo en el que se calefactaban las células con temperatura de consigna 25°C entre las 10:00 y las 22:00 horas. La prueba se llevó a cabo en el periodo comprendido entre los días 14 al 31 de marzo de 2001, la temperatura exterior media fue de 12,2°C.

La célula con el muro de termoarcilla consumió un 3,8% más, con una temperatura media superior de 0,5°C debido al descenso menor de temperaturas por la noche gracias a la mayor inercia del cerramiento. Al igual que para el caso de calefacción constante, la potencia máxima requerida es inferior para el muro de mayor capacidad térmica, en concreto un 17,3%. En la tabla 3.45 se muestran los resultados del análisis.

Célula analizada	Consumo calefacción (Wh)	Temperatura media (°C)	Potencia máxima (W)
Con muro Doble hoja	25720	21,9	750
Con muro Termoarcilla	26760	22,4	620

Tabla 3.45. Resultados experimentales obtenidos en las células laboratorio entre los días 14 a 31 de marzo de 2001. El ensayo consistió en programar la calefacción entre las 10:00 a las 22:00 horas con una temperatura de consigna de 25°C.

Si se hubiera mantenido la misma temperatura media en las dos células, la del cerramiento de doble hoja hubiera consumido un 1,1% más que la construida con el muro de termoarcilla. La tabla 3.46 recoge este análisis aplicando la igualdad de la energía perdida por °C y día.

T med amb (°C)	días	Consumo Termoarcilla (Wh)	T med célula (°C)	Wh/°C·día	% mayor consumo
12,2	17	26760	22,4	154,3	
		Consumo 2 hojas (Wh)			1,1
		25720	21,9	156,0	

Tabla 3.46. Incremento de consumo que se hubiera obtenido habiéndose mantenido la misma temperatura media en las células en los 17 días de análisis, el incremento mostrado se ha estimado aplicando el criterio de igualar la demanda por °C y día en ambas células. Como resultado se muestra que la célula de termoarcilla hubiera consumido un 1,1 % más

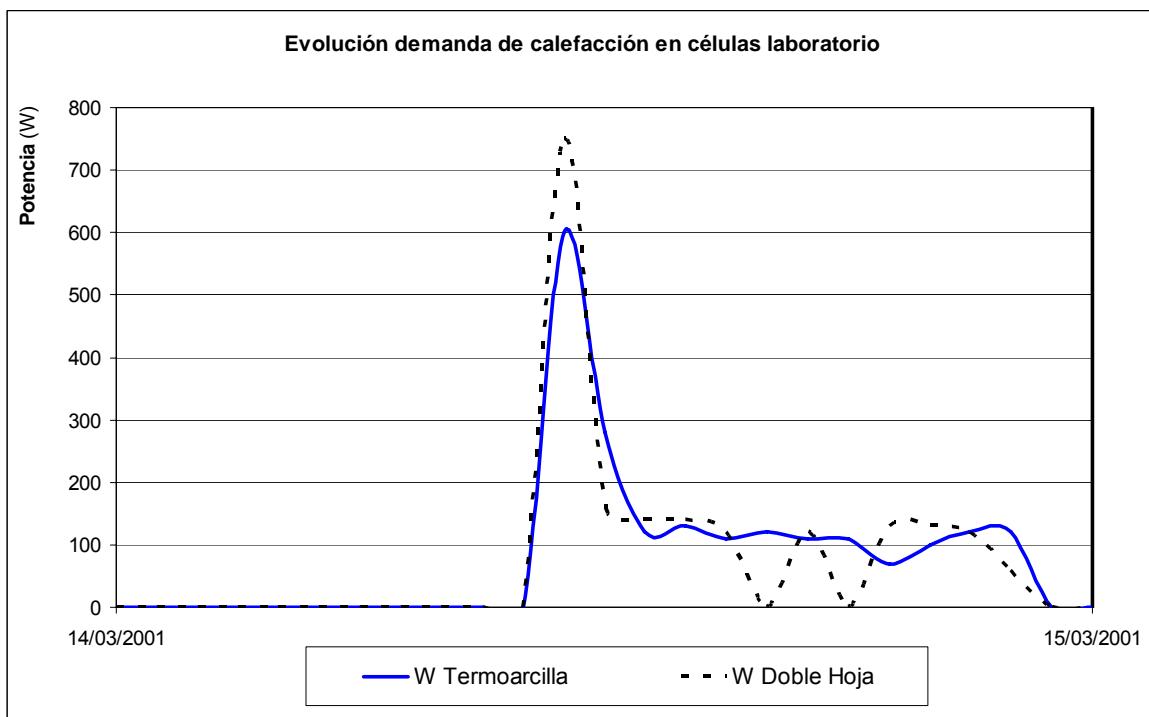


Figura 3.38. Evolución de la demanda energética en las células laboratorio con calefacción intermitente programada entre las 10:00 a las 22:00 horas con temperatura de consigna 25°C. La potencia máxima es menor para la célula con muro de termoarcilla (W Termoarcilla) frente a la de doble hoja (W Doble Hoja).

El efecto beneficioso de la inercia se muestra en la figura 3.39. Los cerramientos de mayor capacidad térmica almacenan más energía que ceden en parte al interior cuando se apaga el sistema auxiliar de calefacción. El muro de termoarcilla transmite mayor energía a su célula verificándose un descenso menor de la temperatura interior. Para el día presentado, cuando se alcanza la menor temperatura en ambas células, para la de termoarcilla se tienen 3,4°C más que para la del muro de doble hoja.

En un edificio esta ventaja se traduciría en menores oscilaciones de temperatura interiores y por lo tanto en un mayor grado de confort para sus usuarios.

Una vez que el sistema auxiliar se pone en marcha, en poco tiempo y a la vez en las dos células se alcanza la temperatura interior de 25°C, pero sin embargo le cuesta más tiempo a la temperatura superficial interior del muro de termoarcilla alcanzar una temperatura próxima a la del interior. Esta circunstancia se debe a que posee mayor capacidad por lo que su evolución de temperatura en el calentamiento es más lenta.

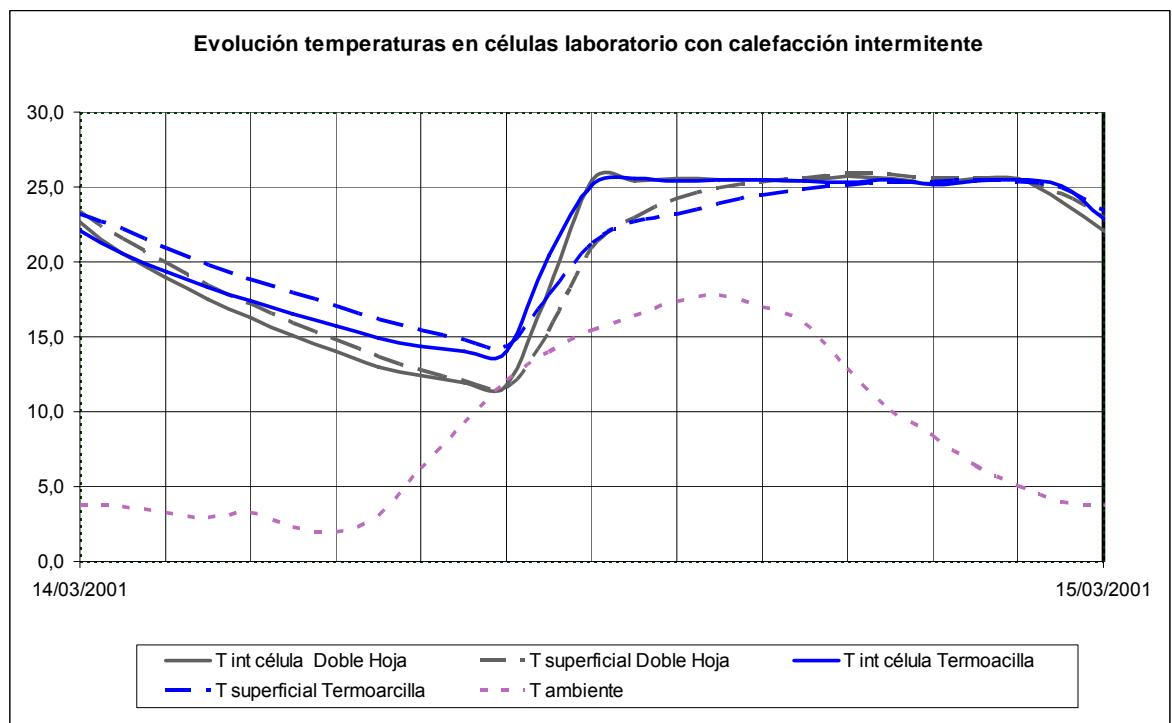


Figura 3.39. Temperaturas interiores en las células y superficiales en cara interior de los muros de termoarcilla y de doble hoja: La calefacción utilizada es intermitente registrándose por la noche descensos más suaves en la célula de termoarcilla debido a su mayor inercia.

Para determinar la inercia térmica de un edificio, caracterizada por la constante de tiempo ($\tau(h)$), se tiene que calcular la capacidad térmica total (C_T) del edificio que es la suma de la de todos los cerramientos, exteriores hasta el aislamiento e interiores, del mismo [3.22].

Una vez determinada la capacidad térmica total, la constante de tiempo se obtiene con la ecuación [3.23].

$$\tau(h) = \frac{C_T}{3600 \times BLC} \quad (h) \quad [3.23]$$

$\tau(h)$: constante de tiempo del edificio, (h)

C_T : capacidad térmica total del edificio, (J/K)

BLC : coeficiente de pérdidas del edificio calculado con las pérdidas de la envolvente por conducción y con la renovación de aire, (W/K)

La constante de tiempo es el parámetro que se utiliza en los métodos de cálculo simplificado (Método 5000, Balcomb, etc) para determinar la captación solar útil media mensual.

Una investigación experimental realizada por Antonopoulos K.A. et al (1995) analizó qué según los resultados obtenidos de la constante de tiempo del edificio a partir de la capacidad térmica, la constante se sobreestimaba hasta en un 100%.

Los errores surgen de la propia modelación que se realiza de los edificios. Dependiendo del grado de zonificación que se introduce en la simulación se pueden obtener valores dispersos del aprovechamiento solar.

Si se introduce tan sólo la envolvente del edificio, la demanda de calefacción del edificio aumentará ya que el aprovechamiento solar será bajo al asignar una inercia baja al modelo al edificio, mientras que si se realiza una subdivisión muy alta el aprovechamiento de radiación solar será máximo contradiciendo los resultados mostrados en la figura 3.41, en la que se muestra la saturación de la captación de radiación.

El método propuesto en la tesis tiene que ser lo más independiente posible de la incidencia de la demanda por zonificación, para ello hay que analizar en primer lugar las variaciones máximas en la demanda de calefacción en función de la inercia, y después comprobar los resultados con edificios reales de Residencial Parque Goya incluidos en el Proyecto Thermie nºBU 178/95 según la metodología propuesta por Antonopoulos K.A. et al (1995) en la que se limitan los valores de la constante de tiempo, asignando esta inercia a los dos métodos comparados.

Para cada mes la ganancia útil de un edificio se determina en función del grado de inercia del edificio definido por su constante de tiempo y la relación entre ganancias y pérdidas. El coeficiente de reducción de la captación solar se denomina factor de utilización. En las siguientes ecuaciones se calcula este factor y la ganancia útil. Éstas en parte son una revisión de las expuestas en el apartado D.2.1 Método 5000.

$$G_{\text{util}} = G_{\text{mes}} \times \eta \quad (\text{kWh/mes}) \quad [3.24]$$

G_{util} : Ganancia mensual útil del edificio.

G_{mes} : Ganancia mensual total debida a la captación solar y las cargas internas (iluminación, ocupación, electrodomésticos, etc).

η : Factor de utilización de la ganancia, permite reducir la ganancia máxima del edificio (solar e interna) que contribuye realmente a la minoración de la demanda de calefacción del edificio. Este factor es función de la inercia térmica del edificio y de las pérdidas mensuales (Q_{perdido}) por conducción e infiltración. Para obtener el factor de utilización en primer lugar se debe obtener el coeficiente GLR:

$$\text{GLR} = \frac{G_{\text{mes}}}{Q_{\text{perdido}}} \quad [3.25]$$

GLR: Relación entre la ganancia mensual (solar más interna) y las pérdidas mensuales (conducción e infiltraciones)

obteniéndose como factor de utilización de la ganancia η :

$$\eta = 1 - (0.581 - \frac{0.0957}{\text{GLR}}) e^{(0.0195 \times \text{GLR} - 0.0279) \times \tau} \quad [3.26]$$

La clasificación de edificios realizada en el apartado D.2.1 Método 5000 pone de manifiesto que la inercia de edificios puede oscilar entre constantes de tiempo ($\tau(h)$) de 10 a 200. El valor infe-

rior corresponde a edificios de baja inercia y el valor máximo a los de muy alta inercia. En la figura 3.40 se muestra la incidencia en el factor de utilización que representa la inercia y el factor GLR.

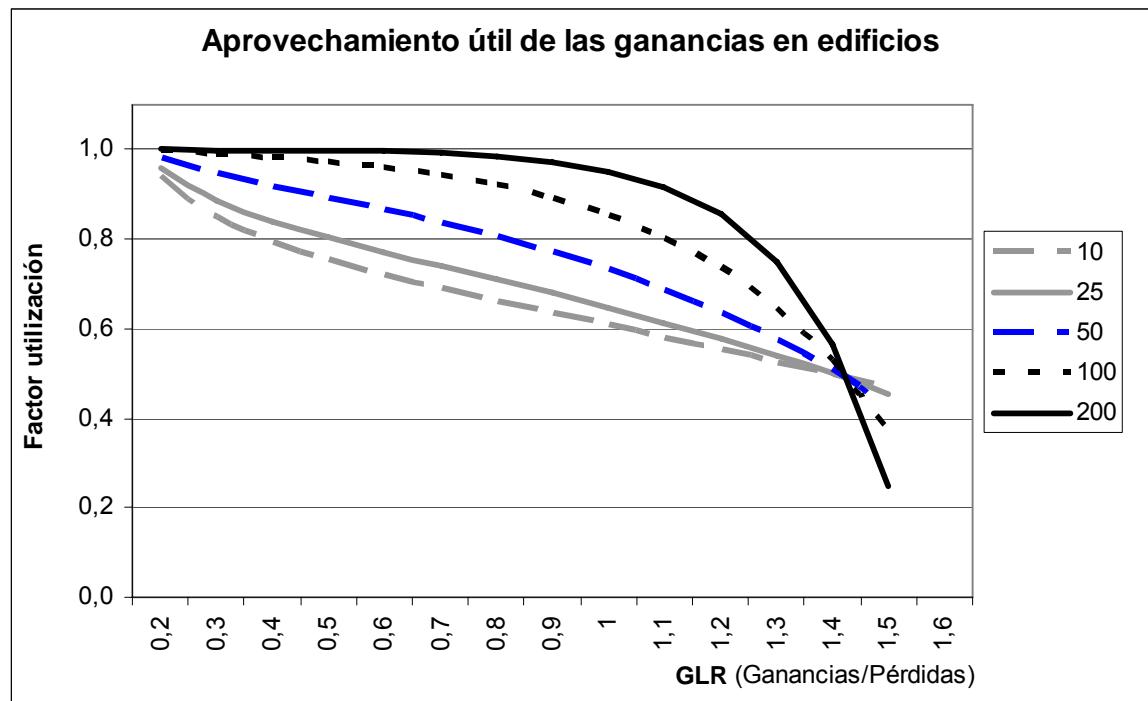


Figura 3.40. Variación del factor de utilización de las ganancias en un edificio en función de la relación entre ganancias y pérdidas desde inercias bajas a altas (constante de tiempo entre 10 y 200 h). (Fuente: Método 5000).

En la figura anterior se puede comprobar para los casos en los que se tiene una ganancia superior a las pérdidas ($GLR > 1$) que el factor de utilización es inferior a 1, por lo que no toda la ganancia es útil, produciéndose en estos períodos un exceso de captación que acarrea sobrecalentamientos, minorándose el término de ganancia útil al tener que ventilar el edificio para eliminar el sobrecalentamiento.

Una mala zonificación puede llevar a que un edificio tenga una constante de tiempo de 10 aunque el edificio real sea de muy alta inercia y el valor de la constante deba ser 200. En la figura 3.41 se representa la diferencia en porcentaje máximo de la ganancia útil de un edificio en función de GLR. El error máximo que se puede cometer en la ganancia útil es de un 37% para valores altos de GLR, mientras que por ejemplo para 0,5 se cometaría un error máximo de un 25%.

Hay que tener en cuenta que el factor GLR depende del clima y además varía para cada mes, de forma general se podría decir que para localizaciones con climas invernales duros su valor será bajo al ser las pérdidas del edificio mayores que las ganancias, con lo que se cometerán menores errores de cálculo que en climas templados en los que GLR se puede aproximar a valores de 0,7 en invierno (Málaga), incluso se pueden dar estos valores de GLR elevados en períodos de baja demanda de calefacción en los climas invernales duros en primavera u otoño.

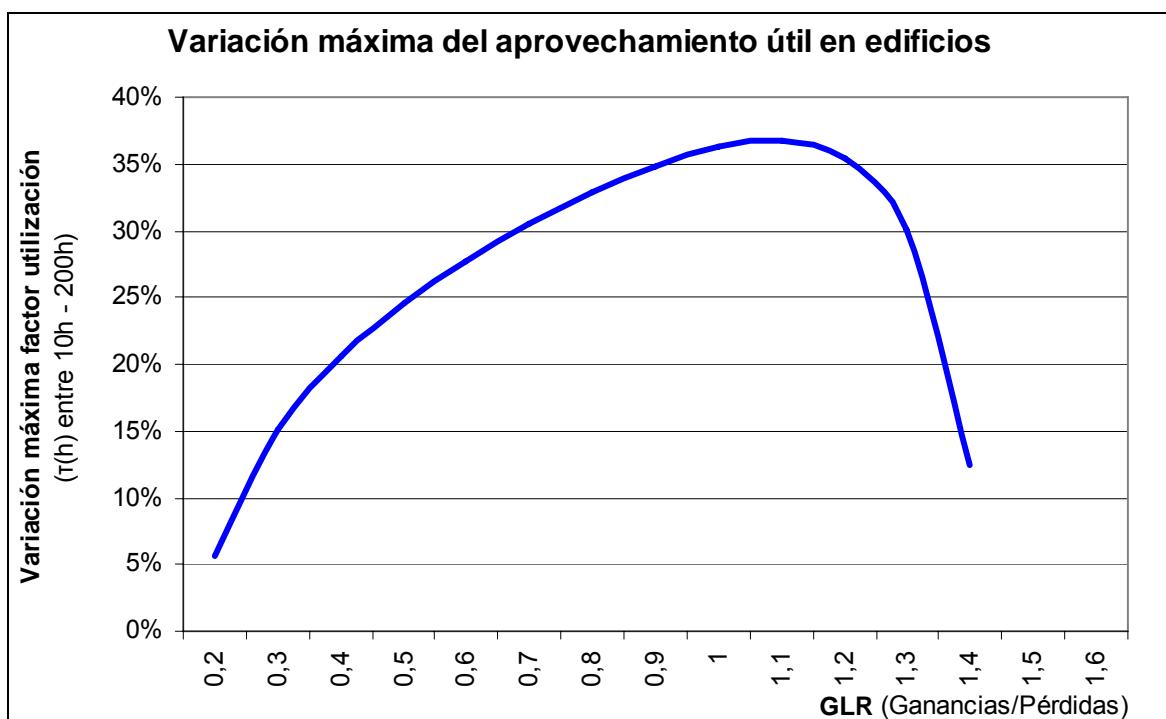


Figura 3.41. Variación porcentual máxima del factor de utilización de las ganancias solares e internas en un edificio. El valor representado corresponde a la comparación al calcular el factor de utilización de un edificio al que se le asiga una constante de tiempo mínima (10h) frente al valor máximo (200 h).

El factor de utilización influye en la ganancia útil y finalmente en la demanda de calefacción del edificio que para un mes ($Q_{calefacción}$) será la diferencia entre la pérdida ($Q_{perdido}$) y la ganancia útil ($G_{útil}$) para dicho mes.

$$Q_{calefacción} = Q_{perdido} - G_{útil} \quad (\text{kWh/mes}) \quad [3.27]$$

$$Q_{calefacción} = Q_{perdido} - \eta \times G \quad (\text{kWh/mes}) \quad [3.28]$$

La diferencia máxima de la demanda de calefacción para un edificio debida a una mala zonificación, será la correspondiente entre tener un coeficiente de tiempo de 10 y de 200. En las siguientes expresiones se analiza cuál es el mayor error posible con un método simplificado (Método 5000, Balcomb, etc).

$$Q_{calefacción_10} = Q_{perdido} - \eta_{10} \times G \quad (\text{kWh/mes}) \quad [3.29]$$

$$Q_{calefacción_200} = Q_{perdido} - \eta_{200} \times G \quad (\text{kWh/mes}) \quad [3.30]$$

$Q_{calefacción_10}$, $Q_{calefacción_200}$: Consumos de calefacción mensuales para el edificio con constante de tiempo 10 y 200, respectivamente.

η_{10}, η_{200} : Factor de utilización de la ganancia para el edificio con constante de tiempo 10 y 200, respectivamente.

El ahorro porcentual de consumo máximo (A_{max}) se evaluará teniendo en cuenta la diferencia de consumo entre los dos casos analizados.

$$A_{max} = \frac{Q_{calefaccion_10} - Q_{calefaccion_200}}{Q_{calefaccion_10}} = \frac{(\eta_{200} - \eta_{10}) \times GLR}{1 - \eta_{10} \times GLR} \quad (\%) \quad [3.31]$$

En la figura 3.40 se mostraba la variación del factor de utilización que modificaba la ganancia útil del edificio con una variación máxima de un 37%. Sin embargo, como se muestra en la figura 3.42 (representación gráfica de la ecuación [3.31]) las variaciones de consumo de calefacción pueden ser mayores dependiendo del diseño del edificio (captación y aislamiento) y del clima al que está sometido.

Se verifica cómo para climas fríos, habitualmente con GLR bajos, el error que se comete con métodos simplificados es bajo (inferiores al 20%), mientras que para zonas cálidas aparecen mayores errores porcentuales (50%), pero en diferencia absoluta pueden ser menores los errores al existir menor consumo de calefacción (Málaga).

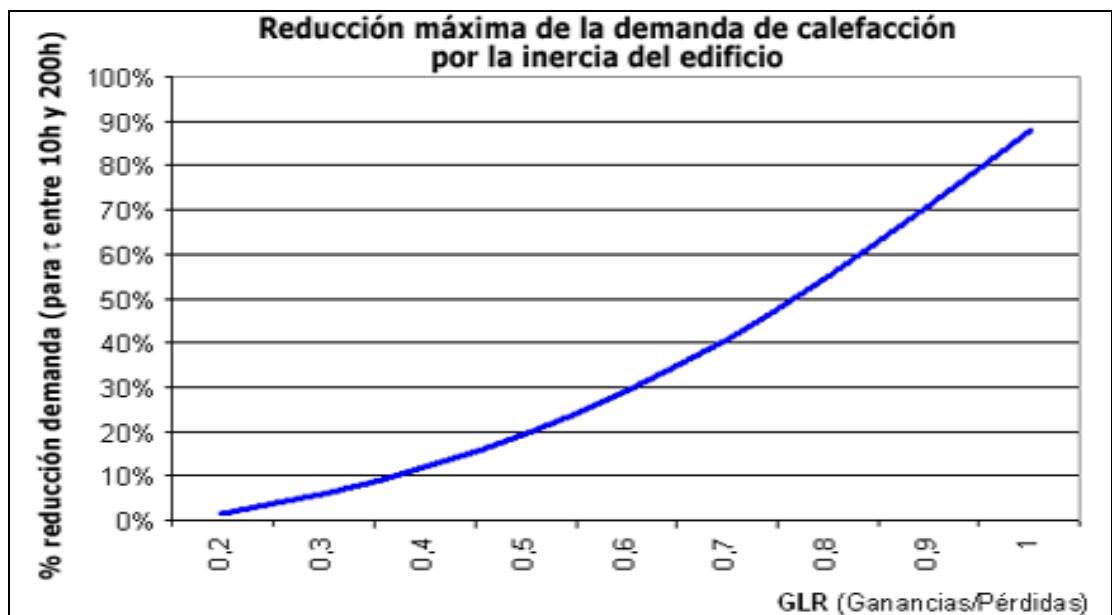


Figura 3.42. Reducción relativa de la demanda (expresión 3.31) consecuencia de asignar una elevada masa térmica (constante de tiempo máxima de 200 h) frente a una baja inercia (constante de tiempo máxima de 10 h) en función del valor GLR.

En la tabla 3.47 se han incluido los resultados de reducción máxima porcentual para los cinco edificios patrón y los seis climas. En éstos se verifica la conclusión extraída de la figura 3.42 con mayores diferencias para zonas templadas entre 40% a 63% frente a valores inferiores para zonas frías situadas entre el 13% y el 29%.

En el caso de utilizar una herramienta dinámica de análisis como TSBI3, la variación máxima de la demanda de calefacción por simplificación de la modelación presenta menos diferencias, pre-

sentando menos sensibilidad respecto a la complejidad de los modelos. Para los edificios patrón empleados la variación máxima para zonas templadas es de 10,3% y para climas fríos es inferior a un 4%, valores expuestos en la tabla 3.48.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Soria	Bologna	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	30,9%	24,4%	10,1%	9,4%	8,1%	5,6%
Bloque 6 viviendas	63,3%	48,8%	29,0%	22,8%	19,6%	16,7%
11 Unifamiliares adosados	57,5%	45,9%	23,9%	21,5%	17,8%	13,6%
Bloque 40 viviendas	61,1%	40,9%	24,5%	22,6%	20,2%	15,7%
Bloque 80 viviendas	58,5%	30,4%	20,0%	18,7%	18,8%	13,3%

Tabla 3.47. Variación máxima de la demanda de calefacción de edificios por error en la constante de tiempo sometidos a diferentes climas. Análisis realizado con el Método 5000.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Soria	Bologna	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	3,7%	4,0%	1,9%	2,2%	1,9%	1,9%
Bloque 6 viviendas	9,1%	6,8%	3,0%	2,6%	3,0%	2,5%
11 Unifamiliares adosados	4,0%	4,2%	1,6%	2,0%	1,6%	1,5%
Bloque 40 viviendas	10,3%	7,2%	3,7%	3,4%	3,7%	3,1%
Bloque 80 viviendas	15,9%	13,7%	8,2%	8,3%	8,2%	6,9%

Tabla 3.48. Variación máxima de la demanda de calefacción de edificios patrón con modelación dinámica (TSBI3). La diferencia máxima se tiene al introducir sólo la envolvente del edificio frente a incluir todos los cerramientos interiores.

3.6.2. Cálculo de una inercia térmica apropiada

Del análisis anterior se puede concluir en cuanto a la inercia térmica:

- Modifica el mayor o menor aprovechamiento de la ganancia solar.
- Su efecto varía con el clima siendo menor su influencia cuanto mayor es la demanda energética.
- En cuanto a los métodos de cálculo de la demanda, el Método 5000 es mucho más sensible a las variaciones en la asignación de la inercia térmica del edificio que el método TSBI3, que, en principio, se puede aceptar como apropiado.

En consecuencia, la selección del valor de inercia térmica es crucial a la hora de comparar los resultados pues esa elección por si sola determina elevadas variaciones entre uno u otro de los métodos. Y, sin embargo, la realidad es única, para un edificio concreto y no puede depender de una mejor o peor asignación de la inercia térmica. Así pues, ¿cuál es el valor más adecuado que se puede asignar a la inercia para no cometer errores elevados con métodos mensuales? Para responder hay que tener en cuenta que depende de cómo se realice la zonificación del edificio.

Al objeto de realizar una asignación realista, única correcta, se va a realizar un análisis de la inercia real de edificios de Residencial Parque Goya, aplicando un método apropiado a los datos de temperaturas, consumos de calefacción, conductancia de cerramientos, parámetros geométricos, etc. Los resultados deberán coincidir de manera razonable con los obtenidos con el modelo de constante de tiempo que se proponga.

Janssen J.E. (1982) desarrolló un método para obtener la constante de tiempo del edificio partiendo de la evolución de temperaturas del edificio y de la contribución de energía del sistema auxiliar.

La constante de tiempo se puede determinar con la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{\frac{Q_{calef}}{BLC} - (T_{ai,i} - T_e)}{\frac{Q_{calef}}{BLC} - (T_{ai,f} - T_e)}\right)} \quad [3.32]$$

$T_{ai,i}$: temperatura interior ambiente en el instante inicial del análisis ($t=0$), ($^{\circ}\text{C}$).

$T_{ai,f}$: temperatura interior ambiente en el instante final del análisis ($t=\Delta t$), ($^{\circ}\text{C}$).

Δt : periodo de tiempo requerido para ir desde la temperatura interior en el instante inicial $T_{ai,i}$ hasta la temperatura final interior ($T_{ai,f}$), (h).

T_e : temperatura media exterior en el periodo analizado, ($^{\circ}\text{C}$).

Q_{calef} : energía aportada por el sistema auxiliar en el periodo analizado, ($^{\circ}\text{C}$).

BLC : coeficiente de pérdidas del edificio. Se determina con las pérdidas de la envolvente por conducción y con la renovación de aire, (W/K)

Dado que en los edificios de Residencial Parque Goya existe calefacción intermitente, se puede particularizar la expresión [3.48] para hallar su coeficiente de tiempo ($\tau(h)$) analizando el descenso de temperaturas de los edificios al apagar el sistema de calefacción, siendo nulo por lo tanto el consumo. Tomando como periodo de análisis el comprendido entre las 23:00 y las 9:00 del día siguiente.

Para el periodo sin calefacción la ecuación [3.32] se simplifica como muestra la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{T_{ai,i} - T_e}{T_{ai,f} - T_e}\right)} \quad [3.33]$$

Los edificios analizados de Residencial Parque Goya son las parcelas PU-9 y P-11 compuestas por 26 unifamiliares adosados y por 50 viviendas en bloque.

De cada uno de los edificios se han seleccionado tres viviendas para obtener el valor del coeficiente de tiempo de cada una de las viviendas de forma independiente. La selección se ha realizado teniendo en cuenta las condiciones de contorno que las diferencian entre ellas. Los resultados obtenidos aplicando la ecuación anterior a la evolución de temperaturas nocturnas sin calefacción para diversos días se muestran en la siguiente tabla.

Edificio patrón \ Clima	PU-9 (26 unifamiliares)			P-11 (50 viviendas en bloque)		
	Unif. 1	Unif. 14	Unif. 21	1ºB	2ºC	3ºA
$\tau_{(h)}$	45	42	43	46	106	126
$\tau_{(h)} \text{ medio edificio}$		42,3			83,5	

Tabla 3.49. Constante de tiempo para viviendas monitorizadas en Residencial Parque Goya partiendo de las temperaturas horarias por la noche sin calefacción, los resultados se han obtenido del análisis de temperaturas de diferentes días. (Fuente: Grupo Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza, 2001).

Estos resultados son similares a los obtenidos por Antonopoulos K.A et al (1995) para viviendas análogas (mismo grado de aislamiento, tamaño de viviendas y número de cerramientos en contacto con el exterior) estudiadas para una gran variedad de tipologías de edificios de Grecia.

Con estos resultados se ha verificado que la inercia de edificios reales es superior a una constante de tiempo de 10 y que para edificios de bloque el valor medio de la constante de tiempo duplica al de unifamiliares.

Se trata ahora de obtener una relación que permita determinar la constante de tiempo a partir del factor de forma. La validez de esta relación se comprobará a la luz de los resultados anteriores, siendo fundamental un buen acuerdo dada la importancia que representa la constante de tiempo en los métodos simplificados.

Con la aplicación TSBI3 se han simulado los cinco edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obteniéndose la demanda de calefacción para todas las variaciones. Con el método simplificado se han calculado los mismos casos con diferentes constantes de tiempo (10, 25, 50, 100 y 200 horas).

Para responder a la pregunta anterior, hay que considerar que al utilizar métodos dinámicos frente a simplificados se cometan menos errores por una subdivisión del edificio como se muestra en las tablas 3.47 y 3.48. Así, la constante de tiempo a utilizar en el método simplificado para cada edificio será la que haga que los resultados de consumo de calefacción sean lo más próximos posibles a los obtenidos con el método detallado (TSBI3).

La constante de tiempo depende de lo compacto que es el edificio. Cuanto menor sea el factor de forma mayor será la inercia, mientras que para un factor de forma alto la inercia será baja. La ecuación planteada para obtener la constante de tiempo para un edificio se muestra en la ecuación [3.34].

$$\tau = A \times e^{(-B \times f)} \quad (h) \quad [3.34]$$

A y B: factores correctores de la constante de tiempo.

f: término función del factor de forma del edificio. Relaciona la superficie exterior con el volumen calefactado, (1/m).

En el análisis comparativo entre los resultados obtenidos por simulación con TSBI3 y los del método simplificado se ha verificado que los parámetros A y B que generan menos diferencia de la constante de tiempo son respectivamente 154,8 y 1,18, siendo la siguiente ecuación la propuesta para determinar la constante de tiempo en el cálculo de calefacción en esta tesis.

$$\tau = 154,8 \times e^{(-1,18 \times f)} \quad (h) \quad [3.35]$$

Para determinar los mejores valores se realizaron variaciones de A comprendidas entre 180 y 40, para B fueron entre 0,5 y 2,0, analizándose el promedio de la desviación absoluta y la desviación típica para ambos indicadores el valor de A=154,8 y de B=1,18 eran los que menores desviaciones presentaban, siendo por lo tanto los más aproximados.

En la figura 3.43 se muestra la aproximación existente entre el valor de la constante de tiempo obtenido con TSBI3 y con la aproximación propuesta. Ambos se ajustan satisfactoriamente. Se puede observar cómo la constante de tiempo se sitúa entre valores cercanos a 40 h (unifamiliares) y a 95 h (viviendas en bloques compactos), datos similares a los obtenidos en los edificios de Residencial Parque Goya (tabla 3.49).

En este caso, la simulación realizada con TSBI3 abordaba el análisis de los cinco edificios patrón sometidos al clima de Zaragoza.

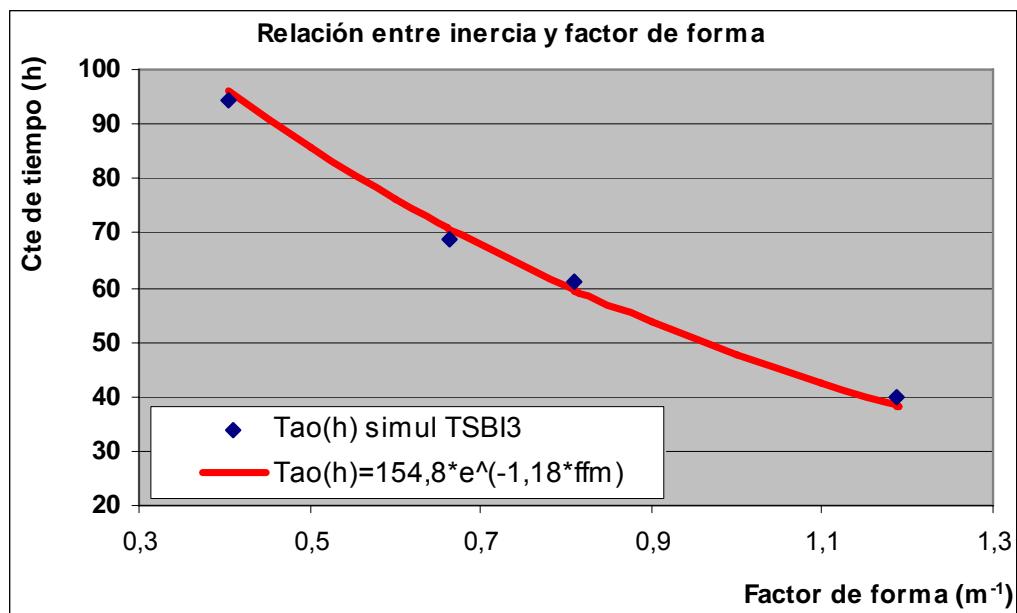


Figura 3.43. Concordancia de la constante de tiempo en función del factor de forma según el modelo propuesto frente a los valores obtenidos por simulación de TSBI3.

3.6.3. Método propuesto para calefacción

Una vez obtenida la correlación de la constante de tiempo que corresponde a cada edificio, calculada para cada tipología de edificio (tabla 3.50) según la ecuación [3.35], se ha procedido a determinar, con la inercia térmica corregida, la demanda de calefacción para los seis climas analizados con el Método 5000.

Las tablas 3.51 y 3.52 muestran la demanda de calefacción por unidad de superficie climatizada (IEA, 1997) bajo las Condiciones de Referencia de Cálculo (CRC) de los edificios patrón sometidos a los seis climas diferentes de análisis obtenidos con el método simplificado propuesto y por la simulación de TSBI3.

Edificio patrón	Factor de forma (1/m)	Constante de tiempo (h)
Unifamiliar	1,186	38,2
11 Unifamiliares adosados	0,81	59,5
Bloque 6 viviendas	0,663	70,8
Bloque 40 viviendas	0,404	96,1
Bloque 80 viviendas	0,395	97,1

Tabla 3.50. Constante de tiempo de los edificios patrón en función del factor de forma aplicando la ecuación [3.51].

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Soria	Bologna	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	46,9	111,7	169,2	195,2	230,6	267,9
11 Unifamiliares adosados	19,0	55,6	102,1	116,3	137,3	168,7
Bloque 6 viviendas	13,0	40,4	76,6	84,5	97,8	126,7
Bloque 40 viviendas	11,1	34,0	60,9	69,1	76,9	100,3
Bloque 80 viviendas	12,0	41,9	64,9	74,0	80,5	103,8

Tabla 3.51. Demanda de calefacción por unidad de superficie climatizada ($\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ año}$) bajo las condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes aplicando el método simplificado de calefacción con la corrección de la constante de tiempo en función del factor de forma del edificio que corrige la inercia térmica de los edificios.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Soria	Bologna	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	38,4	97,4	154,4	188,5	196,1	257,4
11 Unifamiliares adosados	19,5	54,3	94,8	120,2	126,0	168,4
Bloque 6 viviendas	11,7	37,5	68,0	85,0	89,7	122,5
Bloque 40 viviendas	8,6	34,4	58,7	70,4	73,0	101,2
Bloque 80 viviendas	7,7	38,9	62,9	70,7	69,5	102,5

Tabla 3.52. Demanda de calefacción por unidad de superficie climatizada ($\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ año}$) bajo las condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obtenidos con la aplicación TSBI3 modelando la inercia adecuada.

La diferencia máxima de demanda de calefacción por unidad de superficie climatizada bajo las CRC entre el método simplificado y el dinámico (TSBI3) es de un 35,9% para Málaga, según muestra la tabla 3.53. Este valor no es con todo, significativo pues se está hablando de una diferencia de $4,3 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{ año}$. Se vuelve a comprobar que las máximas diferencias se obtienen para climas cálidos, donde son más imprecisos los métodos simplificados. Por ejemplo para un clima frío como el de Copenhague la diferencia máxima es de un 3,9%.

Para el resto de poblaciones se confirma que el error se encuentra por debajo de un 15,0%, valor considerado aceptable según indica la norma UNE – EN - 832 (2000) que estima el error que se puede obtener por diferentes usuarios de un método hasta en un 20% precisamente por aplicación de criterios diferenciados que sería equivalente al análisis presente, siendo válida la aproximación realizada por el método simplificado propuesto.

El error encontrado también está de acuerdo con la divergencia esperable entre aplicaciones dinámicas obtenidas por Lomas K.J et al (1997), habiéndose encontrado en sus análisis una dispersión de resultados de hasta un 16% entre las diferentes herramientas de simulación.

En la tabla 3.54 se muestra el alto grado de correlación existente entre los resultados de las demandas calculadas con el método simplificado y con el dinámico. El caso más desfavorable es para Málaga con un coeficiente de correlación de 0,9842. Estos resultados vuelven a confirmar la validez del método simplificado propuesto, existiendo tan sólo imprecisiones para climas calurosos y edificios masivos, presentándose para éstos una reducida demanda de calefacción. La norma UNE-EN-832 (2000) indica que estos errores relativos elevados en los métodos simplificados se producen en los meses con reducidas demandas de calefacción, sin embargo, el error cometido en diferencia de energía absoluta no es significativo.

El cálculo de la constante de tiempo a partir del factor de forma del edificio permite que el edificio se pueda implementar como una única zona calefactada, debiendo definir los cerramientos que la envuelven indicando su orientación, traducido al análisis energético de la urbanización supone que bastaría con fijar la volumetría que tiene y asignarle los cerramientos envolvente, siendo más fácil de implementar en una aplicación informática frente a tener que definir edificio por edificio su zonificación particular.

Al utilizar el Método 5000, como base de cálculo, el programa podrá utilizar todos los elementos especiales de arquitectura bioclimática que incluye, pudiendo dotar al software a desarrollar de mayor potencialidad de análisis, presentando más posibilidades de diseño optimizadas al clima del lugar.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Soria	Bologna	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	18,1%	12,9%	8,7%	3,4%	15,0%	3,9%
11 Unifamiliares adosados	-2,6%	2,3%	7,2%	-3,3%	8,2%	0,2%
Bloque 6 viviendas	9,5%	7,1%	11,2%	-0,6%	8,3%	3,3%
Bloque 40 viviendas	23,1%	-1,3%	3,8%	-1,8%	5,0%	-0,9%
Bloque 80 viviendas	35,9%	7,2%	3,0%	4,5%	13,7%	1,2%

Tabla 3.53 Diferencia de demanda de calefacción por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obtenidos con la aplicación TSBI3 frente al método simplificado propuesto.

	Málaga	Zaragoza	Soria	Bologna	Leicester	Copenhague
Coeficiente de correlación	0,9842	0,9977	0,9986	0,9977	0,9975	0,9993

Tabla 3.54 Coeficiente de correlación de la demanda de calefacción por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obtenidos con la aplicación TSBI3 frente al método simplificado propuesto.

En las figuras 3.44 a 3.49 se incluyen gráficamente las comparativas de demandas de calefacción de los edificios patrón sometidos a diferentes climas según el método simplificado con corrección de la constante de tiempo y con el método dinámico implementado en TSBI3. En ellas se puede verificar la similitud de la demanda entre ambos métodos.

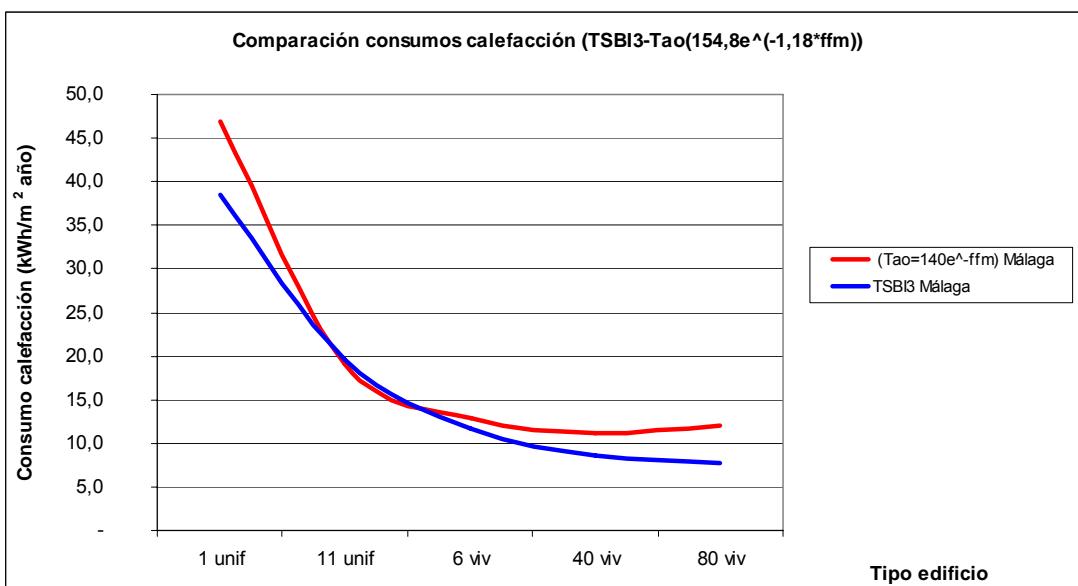


Figura 3.44. Comparativa de la demanda de calefacción anual por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón para Málaga obtenida con el método simplificado de correlación de la constante de tiempo frente a la simulación dinámica (TSBI3).

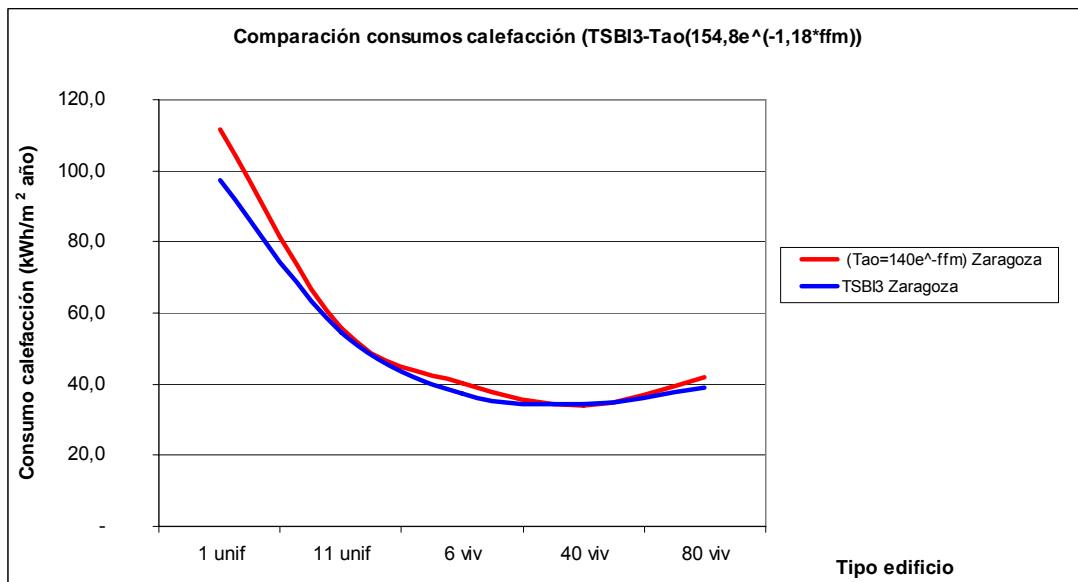


Figura 3.45. Comparativa de la demanda de calefacción anual por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón para Zaragoza obtenida con el método simplificado de correlación de la constante de tiempo frente a la simulación dinámica (TSBI3).

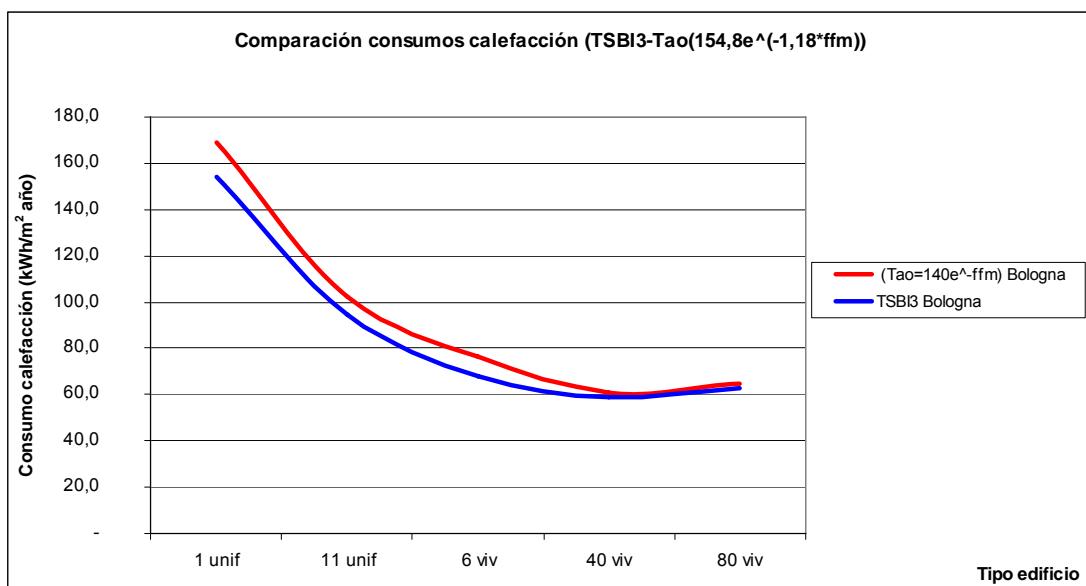


Figura 3.46. Comparativa de la demanda de calefacción anual por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón para Bologna obtenida con el método simplificado de correlación de la constante de tiempo frente a la simulación dinámica (TSBI3).

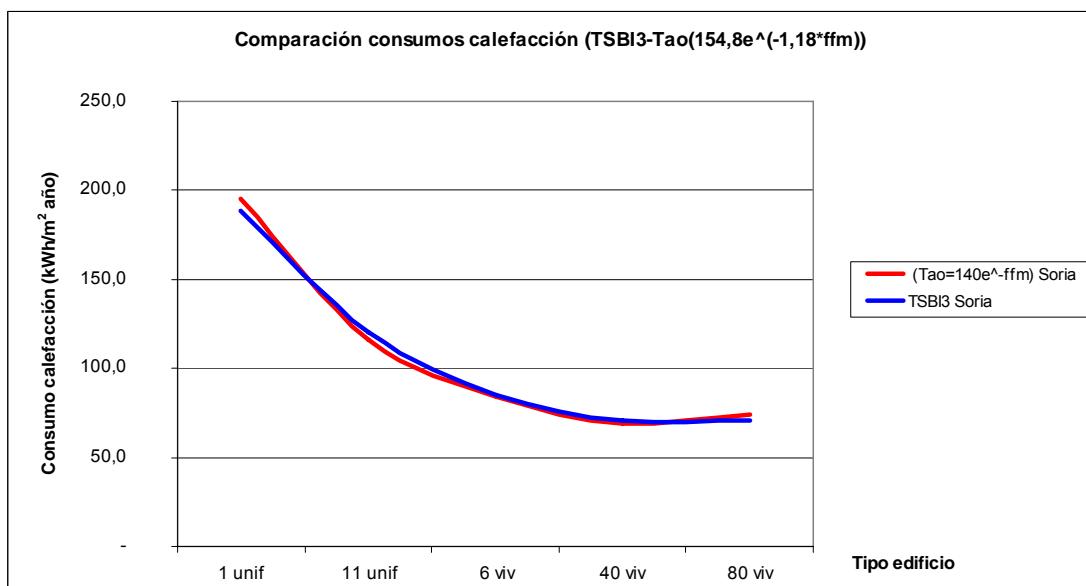


Figura 3.47. Comparativa de la demanda de calefacción anual por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón para Soria obtenida con el método simplificado de correlación de la constante de tiempo frente a la simulación dinámica (TSBI3).

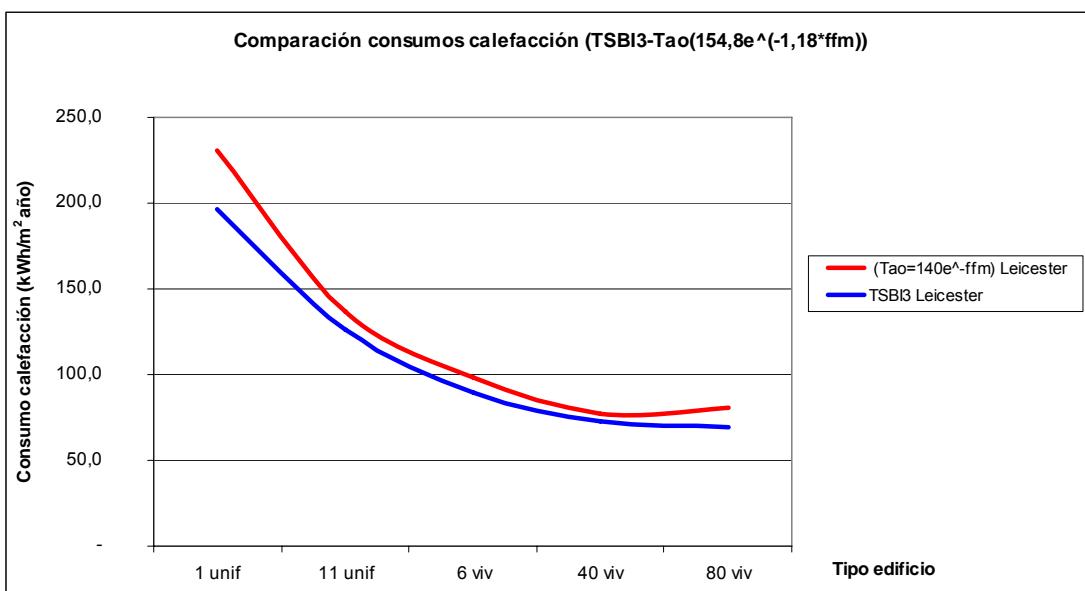


Figura 3.48. Comparativa de la demanda de calefacción anual por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón para Leicester obtenida con el método simplificado de correlación de la constante de tiempo frente a la simulación dinámica (TSBi3).

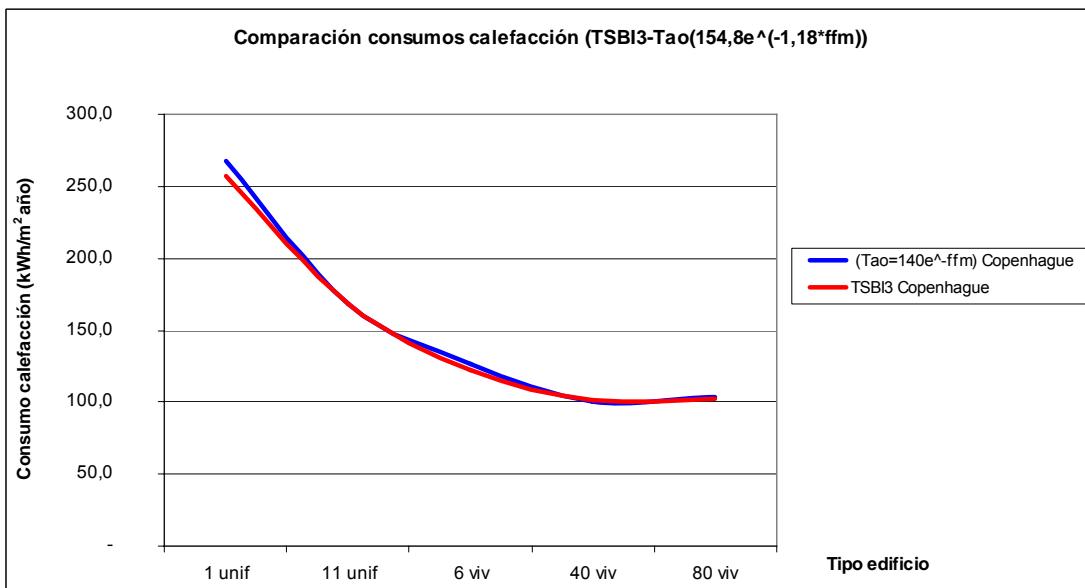


Figura 3.49. Comparativa de la demanda de calefacción anual por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón para Copenhague obtenida con el método simplificado de correlación de la constante de tiempo frente a la simulación dinámica (TSBi3).

Tras los resultados mostrados anteriormente se obtiene una conclusión muy satisfactoria, debido a que al aplicar los criterios UNE, comparar los resultados experimentales propios y ajustar la inercia térmica asignada se ha obtenido que los errores entre el Método 5000 y Tsbi3 son similares a

los encontrados entre los propios métodos dinámicos. Y ello considerando que se han comparado 6 climas y 5 tipos de edificio diferentes, no un solo caso en 1 clima.

3.6.4. Modificación de la captación solar en cerramientos opacos

Una de las ganancias energéticas que se debe considerar para determinar la carga de refrigeración de un edificio son los aportes solares a través de los cerramientos opacos. Para determinarlos Santamouris M. (1997) propone calcularlos a partir de la ganancia instantánea (Q_{smo}), debiendo integrarse ésta para un día completo. La ecuación [3.36] permite el cálculo de la ganancia instantánea a través de cerramientos opacos.

$$Q_{smo} = \sum_1^{ST} U \times A \times [(t_{s-a} - t_o) + df \times (t_{s-a-r} - t_o)] \quad (W) \quad [3.36]$$

ST: el sumatorio se extiende para el número total de superficies opacas del edificio.

A: área de la superficie opaca del cerramiento *i*, (m²).

t_{s-a}: temperatura media sol – aire, (K).

$$t_{s-a} = \frac{\alpha_i \times H_i}{h_o} + t_o + \frac{h_{or}}{h_o} \times (t_c - t_o) \quad (K) \quad [3.37]$$

α_i: absorbancia de la superficie exterior del cerramiento *i*.

H_i: irradiación total sobre la superficie *i*, (W/m²).

h_o: resistencia superficial exterior del cerramiento. Teniendo en cuenta el factor radiativo ($h_{or} = 5,8+4,1v$) y el convectivo ($h_{oc} = 4,11$), (W/m²K). Siendo *v* la velocidad del viento exterior (m/s).

t_c: temperatura del cielo, (K). Se puede estimar por debajo de 6°C respecto a la temperatura exterior.

df: factor de decremento.

t_{s-a-r}: temperatura sol – aire teniendo en cuenta el retraso en el tiempo, (K).

En la anterior expresión existen varios factores que se desconocen cuando se aplica una metodología media mensual, por lo que debe recurirse al empleo de otras más sencillas como la enunciada por la norma UNE-EN 832 (2000) en la que se propone como método de cálculo la expresión que se detalla a continuación.

$$G_r = U \times A \times r_{ext} \times (\alpha \times F - f_f \times h_r \times \Delta T_{c-t} \times 24) \quad (Wh/día) \quad [3.38]$$

U: Conductancia térmica del cerramiento incluyendo las resistencias superficiales interna y externa, (W/m² K).

A: Área, (m²).

r_{ext}: Resistencia térmica superficial, (m² K/W).

α: Absortancia de la superficie externa del cerramiento.

F : Energía incidente diaria sobre el cerramiento según la orientación e inclinación, ($\text{Wh/m}^2 \text{ día}$).

f_f : Factor de forma entre la pared y el cielo (1 para una cubierta horizontal sin sombra, 0,5 para una pared vertical sin sombra).

h_r : Coeficiente superficial de radiación exterior. En una primera aproximación se puede tomar como valor 5 $\text{Wh/m}^2 \text{ día}$.

$$h_r = 4 \times \varepsilon \times \sigma \times (\Delta T_{s-c} + 273)^4 \quad (\text{W/m}^2 \text{ K}) \quad [3.39]$$

- ε : Emisividad para la radiación térmica de la superficie exterior
- σ : Constante de Stefan – Boltzmann ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)
- ΔT_{s-c} : Media aritmética entre la temperatura superficial del cerramiento y el cielo, ($^{\circ}\text{C}$).

ΔT_{c-t} : Diferencia media entre la temperatura del aire exterior y la temperatura aparente del cielo, ($^{\circ}\text{C}$). Como primera aproximación se puede considerar de 9°C para países de Europa del Norte, 11°C para países de la zona mediterránea y 10°C para países de climas intermedios a los anteriores.

En el método de refrigeración propuesto en esta tesis, se ha utilizado la ecuación [3.38] para determinar la captación solar a través de los cerramientos opacos particularizando los siguientes valores:

r_{ext} : Resistencia térmica superficial para cerramiento vertical $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ y para cerramiento horizontal $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, según indica el CTE (2006).

h_r : Coeficiente superficial de radiación exterior igual a $5 \text{ Wh/m}^2 \text{ día}$.

ΔT_{c-t} : Diferencia media entre la temperatura del aire exterior y la temperatura aparente del cielo de 11°C .

3.6.5. Método propuesto para refrigeración

El método propuesto por Santamouris M. (1997) se basa en una modificación del método de los grados día incluyendo como novedad una estimación de la ganancia útil del edificio.

El autor del método lo verificó comparándolo con la aplicación de cálculo dinámico TRNSYS (Klein S. et al, 1988) mediante la simulación de una gran variedad de tipologías constructivas, obteniendo como resultado:

- Las diferencias absolutas medias mensuales entre los resultados estaban comprendidos entre un 0% y un 25%.
- La carga anual de refrigeración variaba entre un 0% y un 15% con un valor medio cercano al 6,3%.

Estos resultados ratifican la validez de los métodos simplificados frente a métodos detallados como enumera la norma UNE-EN 832.

Respecto al método propuesto por Santamouris, para la validación se ha realizado una modificación en cuanto a las ganancias solares a través de los cerramientos opacos, tal como se ha descrito en el subapartado anterior.

Con esta modificación se debe comprobar la validez del método propuesto en la tesis para los diferentes edificios y climas patrón analizados, debiendo obtenerse dispersiones de resultados entre el método simplificado y el detallado (TSBI3) similares a las obtenidas por Santamouris.

Los resultados de la demanda de refrigeración por unidad de superficie climatizada (IEA, 1997) obtenidos con el método simplificado se incluyen en la tabla 3.55 y en la tabla 3.56 se muestran los calculados con la aplicación de cálculo dinámico TSBI3.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Bologna	Soria	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	73,7	50,6	46	13,5		
Bloque 6 viviendas	71,0	48,8	50,1	14,8		
11 Unifamiliares adosados	68,2	48	46,1	19,6		
Bloque 40 viviendas	43,3	29,1	30,8	9,0		
Bloque 80 viviendas	40,6	26,6	28,3	8,1		

Tabla 3.55. Demanda de refrigeración por unidad de superficie climatizada (kWh/m^2 año) bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes aplicando el método simplificado de refrigeración con la corrección de la captación a través de cerramientos.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Bologna	Soria	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	86,7	57,9	48,0	18,6	0,6	4,5
Bloque 6 viviendas	65,3	46,5	39,9	21,5	1,3	5,0
11 Unifamiliares adosados	70,5	49,1	42,4	20,1	1,0	4,8
Bloque 40 viviendas	44,5	30,7	26,8	12,9	0,7	2,9
Bloque 80 viviendas	44,0	29,8	25,8	12,7	0,7	2,5

Tabla 3.56. Demanda de refrigeración por unidad de superficie climatizada (kWh/m^2 año) bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obtenidos con la aplicación TSBI3.

La diferencia de la demanda de refrigeración entre ambos métodos es superior para el caso de climas con poca necesidad, observándose en la tabla 3.57 cómo para el caso de Soria la diferencia máxima es de un 35,8%, mientras que para Málaga es de un 15,0%, Zaragoza un 12,7% y Bologna un 18,0%.

Para los climas de Leicester y Copenhague el método simplificado indica que no tienen demanda, sin embargo con la aplicación TSBI3 se tiene una demanda casi despreciable.

Los resultados obtenidos presentan similar grado de aproximación al obtenido por Santamouris, el cuál indicaba que obtuvo diferencias de hasta un 15%, valor similar al obtenido para las tres poblaciones con valores importantes de demanda de refrigeración (Málaga, Zaragoza y Bologna) en las que el valor máximo es de un 18,2%.

Se puede concluir a la vista de los resultados que el método simplificado de refrigeración propuesto es válido, existiendo diferencias de demanda respecto al análisis dinámico contenidas cercanas al 15% de diferencia máxima, valor por debajo del 20% de error que sugiere la norma UNE-EN 832 para utilización de modelos por diferentes usuarios y ligeramente superior a la metodología propuesta por Santamouris M. (1997).

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Bologna	Soria	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	15,0%	12,6%	4,2%	27,4%		
Bloque 6 viviendas	-0,7%	0,6%	-18,2%	26,4%		
11 Unifamiliares adosados	-4,4%	-3,2%	-15,5%	8,8%		
Bloque 40 viviendas	2,7%	5,2%	-14,9%	30,2%		
Bloque 80 viviendas	7,7%	10,7%	-9,7%	36,2%		

Tabla 3.57 Diferencia de la demanda de refrigeración por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obtenidos con la aplicación TSBI3 frente al método simplificado.

En la tabla 3.58 se muestra el alto grado de correlación existente entre los resultados de las demandas calculadas con el método simplificado de refrigeración y con el dinámico. Estos resultados vuelven a confirmar la validez del método simplificado propuesto.

	Málaga	Zaragoza	Bologna	Soria	Leicester	Copenhague
Coeficiente de correlación	0,9995	0,9993	0,9996	0,9990		

Tabla 3.58 Coeficiente de correlación de la demanda de refrigeración por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obtenidos con la aplicación TSBI3 frente al método simplificado.

3.6.6. Validación combinada de calefacción y refrigeración

Los dos métodos, calefacción y refrigeración, presentan zonas de mayor imprecisión correspondientes a climas cálidos para calefacción y climas fríos para refrigeración. Pero hay que tener en cuenta que ambas zonas son de bajo consumo energético respecto al consumo total del edificio, dando lugar a errores absolutos muy bajos como se muestra en la tabla 3.61.

En este subapartado se analiza la demanda de anual de calefacción y refrigeración para cada población bajo las Condiciones de Referencia de Cálculo CRC de los edificios patrón seleccionados, sometidos a los seis climas de análisis. De los resultados mostrados en las tablas siguientes se verifica que la demanda total conduce a menor diferencia entre los métodos simplificados y el detallado. En la tabla 3.59 y 3.60 se muestran las demandas anuales para los diferentes casos analizados.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Bologna	Soria	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	120,6	162,3	215,2	208,7	230,6	267,9
Bloque 6 viviendas	84	89,2	126,7	99,3	97,8	126,7
11 Unifamiliares adosados	87,2	103,6	148,2	135,9	137,3	168,7
Bloque 40 viviendas	54,4	63,1	91,7	78,1	76,9	100,3
Bloque 80 viviendas	52,6	68,5	93,2	82,1	80,5	103,8

Tabla 3.59. Demanda de calefacción y refrigeración por unidad de superficie climatizada ($\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ año}$) bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes aplicando los métodos simplificados propuestos.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Bologna	Soria	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	125,1	155,3	202,4	207,1	196,7	262,0
Bloque 6 viviendas	77,1	84,0	107,9	106,6	91,0	127,5
11 Unifamiliares adosados	90,0	103,4	137,2	140,2	127,0	173,1
Bloque 40 viviendas	53,1	65,1	85,4	83,3	73,7	104,1
Bloque 80 viviendas	51,8	68,7	88,7	83,3	70,2	105,0

Tabla 3.60. Demanda de calefacción y refrigeración por unidad de superficie climatizada ($\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ año}$) bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obtenidos con la aplicación TSBI3.

Las diferencias máximas de demanda anual se presentan en Bologna (12,9%) y Leicester (14,7%) como muestra la tabla 3.61. Si se analiza la diferencia media de demanda para los seis climas y los cinco tipos de edificios se obtiene una diferencia de tan sólo un 2,5% entre los métodos simplificados y el detallado.

En la tabla 3.62 se muestra la diferencia media por poblaciones para los diferentes edificios, observándose un valor máximo de diferencia de un 9,2% para Leicester.

Edificio patrón \ Clima	Málaga	Zaragoza	Bologna	Soria	Leicester	Copenhague
Unifamiliar	-3,7%	4,3%	5,9%	0,8%	14,7%	2,2%
Bloque 6 viviendas	2,1%	2,9%	12,9%	-5,8%	7,3%	-0,5%
11 Unifamiliares adosados	2,8%	2,7%	9,1%	-4,3%	7,3%	-2,8%
Bloque 40 viviendas	2,4%	-3,2%	6,8%	-6,7%	4,2%	-3,8%
Bloque 80 viviendas	1,7%	-0,3%	4,8%	-1,6%	12,8%	-1,2%

Tabla 3.61 Diferencia de demanda de calefacción y refrigeración por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC de edificios patrón sometidos a seis climas diferentes obtenidos con la aplicación TSBI3 frente a los métodos simplificados de calefacción y refrigeración.

	Málaga	Zaragoza	Bologna	Soria	Leicester	Copenhague
Diferencia media demanda	1,1%	1,3%	7,9%	-3,5%	9,2%	-1,2%

Tabla 3.62 Diferencia media de demanda de calefacción y refrigeración por unidad de superficie climatizada bajo condiciones CRC entre los métodos simplificados propuestos y el obtenido con la aplicación de cálculo detallado TSBI3.

La combinación de los dos resultados conduce a compensar las imprecisiones de los métodos comentadas al principio de este subapartado. La diferencia media para todos los casos es de tan sólo un 2,5% y los bajos valores obtenidos para cada población inferiores a un 10% vuelven a reafirmar la validez de los métodos propuestos, contando con un error promedio bajo, inferior al 20% planteado por la UNE-EN-832 (2000), como se describe en el apartado 3.5.1.

3.6.7. Validación del cálculo con el modelo propuesto

Se han obtenido resultados para una gama amplia de edificios (desde la vivienda familiar hasta el bloque de 80 viviendas) con la lógica dispersión en factores de forma y en inercia térmica, calculados en climas que van desde el cálido de Málaga (T media invernal = 13,4°C) al frío de Copenhague (T media invernal = 1,5°C). En las correspondientes simulaciones se han forzado las condiciones de modo que los errores potenciales de cualquier simulación fueran o nulos o idénticos (figura 3.50). La dependencia con la inercia térmica, factor que puede contribuir hasta en un 60% de variación en el modelo de partida, basado en el método 5000, se ha reducido prácticamente a cero (fig. 3.43) al generar una función de corrección frente al factor de forma, función que proporciona los mismos valores para esta inercia que proporciona el método de contraste, TSBI3. Por ello, las dispersiones presentadas en las tablas anteriores reflejan la desviación que el modelo de la tesis presenta frente al modelo “perfecto” de TSBI3.

Como muestra la figura 3.50 estas dispersiones, presentadas junto a las debidas a otras causas de error ya comentadas, son significativamente menores para toda la gama de climas y edificios testeados, excepto el caso de Málaga en el que la demanda de calefacción es tan baja que cualquier pequeña desviación puede presentar un valor elevado para la desviación relativa aunque sea mínima la diferencia absoluta.

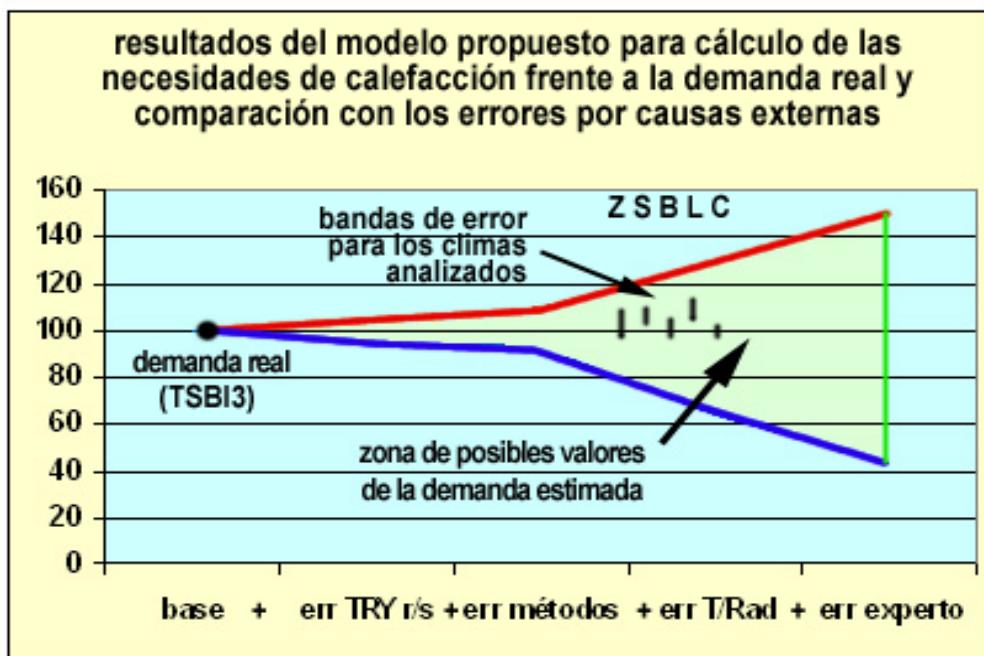


Fig. 3.50. Desviaciones del modelo propuesto frente al correspondiente valor proporcionado por TSBI3 para los distintos edificios y climas considerados. La figura presenta estas desviaciones frente a los errores potenciales en la aplicación de TSBI3 (no se ha incluido el caso de Málaga, que se comenta en el texto)

Todo ello permite definir el modelo de la tesis como perfectamente compatible, en el cálculo de la demanda de calefacción anual, con el modelo de referencia TSBI3.

3.7. Criterios adicionales del método propuesto

Además de la precisión, un método de cálculo debe cumplir una serie de requisitos adicionales para validarla, estos factores según ASHRAE (1997) son los que se incluyen en la tabla 3.63, indicando el cumplimiento de los diferentes criterios o los condicionantes que deberán tenerse en cuenta para desarrollar la aplicación informática de cálculo basada en el método propuesto en la tesis.

Criterios adicionales a tener en cuenta en la elección de métodos de cálculo (ASHRAE, 1997)	Cumplimiento de los criterios adicionales en los métodos propuestos de calefacción y refrigeración
Precisión: el método debería ser suficientemente preciso. Debido a la gran cantidad de parámetros involucrados en el balance energético, la precisión absoluta no es posible (ASHRAE referencia a Waltz 1992).	Los métodos propuestos son suficientemente precisos. La diferencia de la demanda de calefacción y refrigeración se sitúa en un 2,1% de error medio anual para todos los casos analizados, encontrándose un error máximo mensual de un 14,4%.
Sensibilidad: el método debería ser sensible a las opciones de diseño consideradas. La diferencia energética entre dos variaciones debería ser precisa para diferencias no despreciables.	Una aplicación informática en la que se implemente la metodología permitirá realizar diversos análisis comparativos (grado de aislamiento, ganancias solares, orientaciones de edificios, análisis de sombreadamientos externos, etc), existiendo suficiente precisión entre dos variaciones.
Velocidad y coste: el tiempo total de búsqueda de datos, preparación de parámetros de entrada y análisis de resultados, para hacer un análisis debería ser apropiado al potencial de beneficios conseguidos. Con mayor velocidad más opciones pueden ser consideradas en un mismo tiempo. El coste de los análisis está directamente condicionado por el tiempo de análisis.	El tiempo necesario para introducir los datos del edificio para el análisis será breve, siendo una de las principales características de los métodos simplificados y un objetivo especialmente cuidado aquí.
Reproductibilidad: el método no debería permitir la definición vaga de algún parámetro que permitiera que diferentes usuarios obtuvieran resultados diferentes para un mismo modelo.	El análisis se realiza con datos simples de los edificios, por lo que dos usuarios que introduzcan un mismo modelo de un edificio los resultados de demanda no diferirán prácticamente.
Fácil uso: este criterio condiciona el coste económico (velocidad) y la reproductibilidad de resultados.	Dada la sencillez de los modelos y salvada la dificultad de la zonificación, que es el principal handicap de otros métodos, se garantiza la reproductibilidad y el reducido tiempo en implementar un modelo.

Tabla 3.63. Comprobación de criterios adicionales del método propuesto y condicionantes a tener en cuenta en el desarrollo de una aplicación informática basada en el método. (Fuente: ASHRAE, 1997).

Además, la selección de un programa de análisis de simulación depende de diferentes implicaciones; como el número de veces que se utilizará, de la experiencia del usuario y del hardware disponible. Para seleccionar una aplicación que utilice un método determinado hay que tener en cuenta:

- *Complejidad de datos de entrada:* influenciado directamente por la posibilidad de disponibilidad de los datos de entrada.
- *Calidad de resultados:* deberían ser fáciles de interpretar.
- *Disponibilidad de datos meteorológicos:* un condicionante importante es la disponibilidad de estos datos. Si no se dispone de datos habrá que crearlos con modelos o quizás rechazar la utilización de un método detallado.
- *Capacidades auxiliares:* la incorporación de análisis económicos y de diseño pueden condicionar la selección de la aplicación

En este caso el método de cálculo propuesto cumplirá los tres primeros apartados anteriores, ya que los datos de entrada y los datos climáticos son fáciles de conseguir siendo el resultado del balance térmico fácilmente interpretable, obteniendo como resultado la demanda del edificio (kWh/año o, mejor, kWh/m² año), valor que facilita la comparación con diferentes variaciones de diseño de un edificio, así como el valor de la demanda total, en kWh/año, del conjunto de edificios objeto del análisis. Evidentemente, estos valores deberán poderse desagregar en sus componentes de calefacción y refrigeración.

Además para el conjunto de edificios es interesante obtener la demanda energética por unidad de superficie climatizada (kWh/m² año), valor que permite comparar la bondad entre diferentes urbanizaciones de diferentes tamaños.

La última consideración dependerá de cómo se implemente el método, debiendo tenerse en cuenta la posibilidad de permitir realizar diferentes comparaciones en fase de prediseño de áreas de acondicionamiento, orientaciones, grado de aislamiento, etc, siendo un ejemplo de este tipo de implementación la aplicación METEO (2000) en la que se pueden comparar diferentes opciones de diseño de modo sencillo e interactivo, facilitando al usuario las decisiones en la fase de prediseño.

Los resultados de esta tesis han permitido cimentar la base de la aplicación URSOS, proyecto financiado por IDAE y que ha sido utilizada en sus versiones previas en la optimización energética de la urbanización de Valdespartera de 9.600 viviendas. Mediante la extensión del convenio, una vez finalizada la versión beta, una serie de seminarios por las diferentes CCAA

La implementación del método permitirá aplicar el método de análisis a áreas urbanas en fase de planificación, permitiendo a los técnicos urbanistas fijar unos parámetros adecuados que contribuyan al ahorro energético mediante la configuración del entramado de calles, separación entre edificios, orientación de éstos y la definición de la edificabilidad del área planificada. Actualmente está siendo utilizada para optimizar varias actuaciones urbanísticas en el cinturón de Madrid.