



AYUDA AL PROYECTISTA EN SUS DECISIONES TEMPRANAS PARA
UNA ARQUITECTURA TERMICAMENTE CONFORTABLE.

Prof. Arq. José Miguel Aroztegui
Servicio de Climatología Aplicada a la Arquitectura
Facultad de Arquitectura - Universidad de la República.
Montevideo - República O. del Uruguay.

RESUMEN

Se expone un método expeditivo para la evaluación térmica de proyectos, adecuado principalmente para auxiliar los primeros niveles de decisión en el diseño. El método ha sido experimentado en la enseñanza de Taller de proyecto en la Facultad de Arquitectura. Hay dos indicadores de calidad: la temperatura interna media y la fluctuación de la temperatura.

ABSTRACT

A expeditious method for thermal evaluation in architectural projects is exposed. The method is principally appropriate for early design decisions. It was tested in a project atelier at the architecture school. There are two quality indicators: the internal mean temperature and the temperature fluctuation.

I. INTRODUCCIÓN.

Está reconocido que las primeras decisiones globales en la concepción arquitectónica -forma, orientación, distribución espacio/funcional, transparencias, etc- son decisivas en la calidad térmica del espacio interior. Si se pretende que estas decisiones tempranas puedan ser evaluadas por el mismo proyectista, tendrá que dotársele de instrumentos adecuados, que no compliquen la ardua tarea de síntesis de condicionantes para cada decisión.

El objetivo del método que se expone es la apreciación rápida de las consecuencias en el ambiente térmico, de las decisiones que se adoptan en las primeras etapas del proyecto. Es un instrumento de ayuda para el diseño de edificios que ofrezcan condiciones mínimas de habitabilidad térmica y limiten la potencia y consumo de las instalaciones de climatización. Hay una notoria carencia en esta área. Los métodos usuales pasan de orientaciones generales que no permiten cuantificar opciones, a técnicas que exigen numerosos datos y detalles aún no disponibles en esa instancia del proyecto. Este vacío es muy sensible en la enseñanza del diseño arquitectónico, que acaba omitiendo la responsabilidad del proyectista en el confort del espacio construido. El método propuesto busca llenar este vacío y ha sido ensayado en diferentes niveles de la enseñanza de Taller de arquitectura.

El método no es válido para cualquier condición climática. Se adecua a climas templados, con inviernos algo más rigurosos que los veranos, como es el caso del Uruguay. Se basa en el supuesto de que la envolvente opaca y las aberturas de ventilación cumplen con exigencias mínimas de calidad térmica preestablecidas (Ref.

Bibl. 1). El cumplimiento de estas exigencias no implica condicionantes especiales para las etapas tempranas, ya que se refieren a los de talles y especificación de materiales decisiones que se adoptan en etapas más avanzadas. Las variables de proyecto que se incluyen son las que deben ser definidas por el proyectista en el primer nivel de decisiones

Los indicadores del desempeño térmico fueron escogidos de manera de dar referencias directas al confort y al consumo de energía resultantes.

2. FUNDAMENTOS DEL MODELO.

Sí existe una variación cíclica de las temperaturas exteriores y no hay producción interna u otra fuente de calor, la temperatura media en el interior de un edificio (TIM) será igual a la temperatura externa media (TEM). Ante la producción interna de calor o su incorporación desde el exterior (por radiaciones solares, por ejemplo), se producirá un incremento Δt en la TIM por encima de TEM.

Con las formulaciones clásicas y aceptando simplificaciones para las variables de compleja determinación, la ecuación 1 correlaciona los fenómenos:

Ec.1

$$\phi + \sum I_{gm}(U_o \cdot \alpha \cdot R_i \cdot A_o / V + G \cdot A_t / V) = \delta t (f \cdot U_m + 0,33 \cdot R_{ph})$$

donde:

U_o = Transmitancia de Cerramientos opacos $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
 ϕ = producción interna de calor W/m^3
 I_{gm} = Intensidad media de Rad. Solares W/m^2
 A_o = área de cerramientos opacos m^2

α = Absortancia
 R_i = Resistencia superficial interna $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
 V = volumen interno m^3
 G = Factor Solar del área transparente
 A_t = área transparente m^2
 δt = incremento de TIM sobre TEM $^\circ\text{C}$
 f = Factor de Forma $1/m$
 U_m = Transmitancia media de la env. $W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$
 $0,33$ = Calor de Vent. por volumen
 R_{ph} = Renovaciones de aire por hora

El primer miembro de la Ec.1 incluye la producción de calor interno y las ganancias térmicas solares; el segundo miembro es la expresión de las pérdidas térmicas a través de la envolvente y la ventilación.

2.1. Condiciones de invierno.

En condiciones de invierno un buen diseño arquitectónico procurará aumentar el valor de $6t$ con un mínimo de producción de calor interno.

Si los cerramientos opacos cumplen exigencias mínimas de desempeño térmico los aportes solares a través de ellos no tienen importancia significativa en las condiciones térmicas medias internas en el mes más frío. Al despre- ciar estas ganancias térmicas, la respuesta del edificio se aproxima a las condiciones crí- ticas (sin Sol) y se identifica mejor el efec- to de la resistencia térmica de la envolvente, en relación con las pérdidas de calor interno. Sí además, para simplificar, se utiliza la Re- sistencia Térmica en sustitución de la Transmi- tancia y se arbitran condiciones de referencia para la ventilación de invierno ($R_{ph}=1$), se ob- tiene esta expresión de la temperatura media internas

$$Ec.2 \quad TIM(^\circ\text{C}) = TEM + \frac{1}{\frac{1}{f(R_m + 0,16)} + 0,33}$$

donde:

TIM , TEM , ϕ , I_{gm} , G , A_t , V , f , ya fueron def- nidos,
 R_m = Resistencia térmica media intrínseca de los cerramientos de la envolvente
 $R_m = 1/U_m - (R_i + R_e)$ $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
 $0,16 = R_i + R_e =$ Resistencias superficiales

La ecuación 2 puede ser expresada en forma grá- fica, como en el Anexo.

En invierno se debe evitar que la fluctuación por debajo de las temperaturas medias sea muy acentuada. Las ganancias solares no pueden com- pensar grandes insuficiencias en el valor de TIM que resulta de la producción interna de calor, puesto que ello implica grandes oscilaciones nocturnas o durante periodos nublados.

Para las condiciones de Montevideo pueden ser adoptados como referencia los valores de $7W/m^3$ para la producción de calor interno estandar, TIM de $16 \text{ } ^\circ\text{C}$ como valor aceptable, con un lími- te inferior de $14 \text{ } ^\circ\text{C}$ cuando no se incluyen las ganancias solares.

También es posible expresar la producción de calor interno necesario para mantener durante todo el invierno una temperatura media dada. La expresión del calor necesario durante todo el invierno para mantener la TIM constante e igual a la temperatura de base adoptada, será:

$$Ec.3 \quad E \text{ (kWh)} = \phi \cdot ^\circ\text{D} \cdot V / 41,67 \delta t$$

en donde ϕ , δt , V ya fueron definidos,
 E = calor necesario kWh
 $^\circ\text{D}$ = Grados-día para una temperatura base.

2.2. Condiciones de verano.

En condiciones de verano un buen diseño archi- tectónico procurará evitar que las ganancias debidas al Sol eleven excesivamente las temperaturas internas. El calor que penetra debido al Sol por los cerramientos opacos, especialmente por los techos, ya no es despreciable como en invierno. La resistencia térmica de la envolvente cumple un papel ambiguo: por una parte es beneficiosa porque dificulta la entrada del calor solar, pero por otra incon- veniente, porque limita las perdidas del calor que ha penetrado.

El análisis térmico del ambiente interno basa do en valores medios de temperatura, como elrealizado para invierno, carece de sentido por varios motivos: a. la ventilación es determinante de las condiciones térmicas y su valor valor medio no tiene significación practica, b. la principal responsabilidad en la elevación de las temperaturas internas radica en los cerramientos transparentes y ocurre en el momento de máxima intensidad de las radiaciones solares sobre el plano, e. no es valorada la respuesta inercial inter na, fundamental en el verano cuando las cargas térmicas tienen amplias oscilaciones.

En los casos en que existen exigencias mínimas a los cerramientos opacos, que implican amortiguaciones del orden del 10% y retardos de más de 6 horas, la importancia de las car gas térmicas fluctuantes debidas al Sol sobre los cerramientos opacos, es de poca entidad frente a las fluctuaciones provocadas por los cerramientos transparentes. Cuando el fin per seguido es la evaluación de variables significativas, la carga fluctuante por los cerramientos opacos puede ser despreciada.

En este caso, la calidad térmica del ambiente la expresa fundamentalmente la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura me dia, llamada fluctuación de la temperatura interna (t_i).

Modelizando la fluctuación de la temperatura interna por el método de la admitancia (Ref. Bibl.2) y considerando que la ventilación a 1ª hora de máxima radiación es convenientemen te reducida a 1 Rph, la expresión resultante para la fluctuación máxima de la temperatura interna, será:

$$Ec.4 \quad t_i(^\circ\text{C}) = \frac{\sum A_t/V(I_{g^{\sim}} \cdot G_c + 6 \cdot t_e^{\sim}) + 0,33 \cdot t_e^{\sim}}{1}$$

donde:

A_t = área transparente m^2
 Transmitancia del vidrio = 6 $W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$
 $I_{g^{\sim}}$ = fluctuación Rad. solares W/m^2
 t_i = fluctuación de la temp.interna $^\circ\text{C}$
 t_e = fluctuación de la temp.externa a la hora de $I_{g \text{ max}}$ sobre el plano $^\circ\text{C}$
 G_c = Factor Solar cíclico En condiciones estandar puede asumir $G_c=0,6 \cdot G$
 $N = \sum A \cdot Y/V + 0,33$ Caracteriza la inercia térmica interna del ambiente.

$\Sigma A.Y$ = Sumatoria de las superficies que limitan el ambiente interior, multiplicadas por la admitancia de cada una W/°C

Los valores de N pueden ser tipificados en 3 categorías inerciales:

- I. Paredes, pisos y techos pesados sin revestimientos aislantes N=10
- II. Paredes, pisos y techos normales con terminaciones normales N= 7
- III. Paredes, pisos y techos leves con terminaciones aislantes N= 4

El cálculo del numerador de la Ec.4 para las condiciones de un local dado, se facilita con planillas donde constan los valores de $I_{g\sim}$ y de t_e para cada plano. Cada orientación de área transparente de cada ambiente debe ser evaluada separadamente, puesto que las horas críticas son diferentes. Cuando el ambiente puede ser ventilado desde más de una orientación, es dable esperar que el aire renovado no está a una temperatura superior que el aire interno. Esto anula el término correspondiente a la ventilación ($0,33.t_e\sim$) y permite considerar en el cálculo la eventual ventilación cruzada.

Para las condiciones de Montevideo se puede comprobar que las fluctuaciones internas menores que 1,5 °C indican un desempeño aceptable. Los máximos de área admisibles para mantener la fluctuación dentro de márgenes aceptables, se pueden expresar en forma gráfica de muy fácil lectura (ver Anexo).

3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.

Las Planillas I y II, entregadas a los proyectistas para el análisis son presentadas en el Anexo. Su empleo es versátil. Se basa esencialmente en "el ensayo y error" y la retroalimentación. Es imposible presentar todas las posibilidades de análisis. En los esquemas y texto de la página siguiente se muestran resultados "congelados" del estudio de dos propuestas de organización de 32 unidades de

La escala del análisis puede englobar todo el edificio, referirse a una unidad de vivienda o a un solo ambiente.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1. Aplicaciones didácticas.

El método ha sido utilizado en 3 instancias de Taller de Proyecto de Arquitectura:

1. para realizar el análisis formal/área transparente/orientación, en la corrección de esquicios en 2° año de anteproyecto.
2. para la autoevaluación en la entrega del anteproyecto de 2° año.
3. para el análisis de forma/área transparente orientación y la especificación de las características térmicas de la envolvente opaca, en el Proyecto (trabajo final).

Las tres instancias permiten apreciar la fácil comprensión y aplicación por los estudiantes,

a pesar de que el método no fué expuesto en clases teóricas precedentes. En la corrección de esquicios es útil para cuantificar las con secuencias térmicas de planteos que exageran la exposición o la transparencia, permitiendo valorar la orientación de éstas. En la entrega del trabajo el alumno anexa su autoevaluación. Esto es muy formativo, puesto que lo hace responsable de las condiciones térmicas que ofrece su propuesta. En la instancia del proyecto final el método permite ajustar el diseño y en particular, diseñar los cerramientos opacos para alcanzar las resistencias térmicas que la evaluación global indicó como necesarias.

Los intentos de ser aplicados en 1er. año no fueron exitosos, debido a que el estudiante recién hace su primer ejercicio de diseño y está desbordado por las condicionantes. Una dificultad verificada es la de ganar al profesor que orienta el diseño, para que sea incluida la temática térmica entre las condicionantes explícitas del ejercicio. Contando con su apoyo, el estudiante se motiva fácilmente.

4.2. Comparación de la sensibilidad a las variables con modelos más complejos.

Para realizar esta comparación se presenta la dificultad de tener que suministrar datos que no están definidos en esta etapa del diseño, pero que la simulación por computador los requiere. En estos casos se arbitraron valores que corresponden a unidades de vivienda estándar.

Dado que el objetivo del método es auxiliar en la toma de decisiones, frente a las variables en las instancias tempranas del diseño, más que comparar las temperaturas que resultan, interesa comparar las tendencias en la variación de éstas.

Como referencia de comparación se ha empleado el programa SETI, basado en el método de la admitancia (Ref.Bibl.3).

La comparación muestra que, si bien resultan valores de temperaturas internas diferentes, la sensibilidad de la respuesta frente a las variables es coherente en ambos métodos.

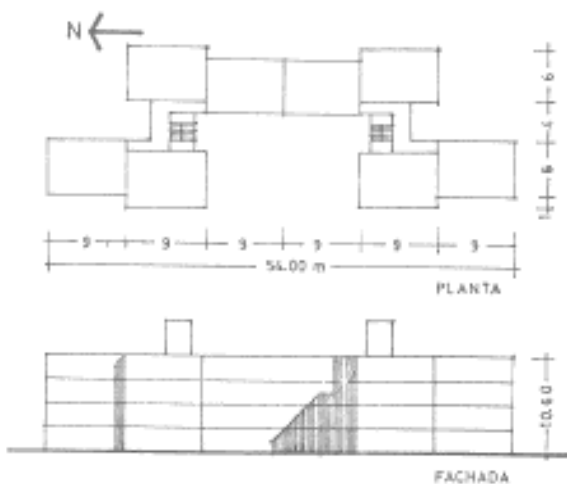
4.3. Aplicación en otras regiones climáticas

Las temperaturas medias mensuales son datos climáticos procesados por todas las estaciones meteorológicas. Esto facilita la adaptación local del método. La escala de TIM en abscisas debe ser dislocada, de manera que el origen coincida con la temperatura media del mes más frío. Por este procedimiento se obtienen indicaciones de las diferentes exigencias térmicas planteadas a la arquitectura en locales distintos, si se desean respuestas internas semejantes. En el ábaco de la hoja I del Anexo la escala presentada corresponde a las condiciones más frías del país (Montevideo). La temperatura media de julio en la zona más cálida (Artigas) es 2 °C más elevada, luego su arquitectura puede ser más expuesta, con cerramientos menos resistentes térmicamente, o una menor necesidad de calor interno.

El ábaco relativo a las ganancias solares re-

quiere un ajuste, de acuerdo a la disponibilidad media de radiaciones en invierno. Para el país, estas diferencias no son significativas. En la evaluación de las condiciones de verano, en cambio, a las diferencias en la insolación se agregan importantes variaciones en la temperatura del aire, que hacen imprescindible la confección de planillas especiales para la zona norte del país.

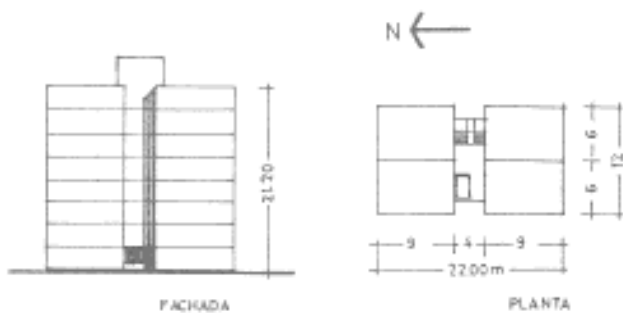
Disponiendo de la distribución de las frecuencias acumuladas de las temperaturas medias de una localidad (Montevideo Ref. Bibl.4), el método permite fácilmente proyectar la exigencia para un grado de rigurosidad conocido y para el mes que se desee. Asimismo es posible correlacionar la exigencia de un mes con otro. Por ejemplo, una probabilidad del 50% en julio, significa para junio y agosto una probabilidad del 42% en Montevideo.



Iª PROPUESTA	Conjunto	Unidad + comprom.	Unidad -comprom.
Area expuesta	2377 m ²	117	46
Volumen int.	5170 m ³	143	143
A.Trans.(23%Apiso)	449 m ²	12,4	12,4
f (1/M)	0,46	0,82	0,32
Rm (m ² °C/W)	0,28	0,31	
TIM (°C)	15,5	13,9 *	17,0

* Se debe mejorar la resistencia de las unidades expuestas al techo.
 Sí Rtecho = 0,85 ==> RM=0,34
 Con f=0,82 ==> TIM=14°C
 Para alcanzar TIM=16°C se necesitan 3,8 W/m³ de ganancias solares.
 con ventanas al norte se requieren 9 m² : es posible
 con ventanas al oeste se requieren 25 m²: no es posible.
 Las unidades que no pueden abrir ventanas al norte tendrán mayor consumo de energía:
 8 m² al oeste ==> 1 W/m³, faltan 2,8
 E = 2,8x2,47x143 = 989 kW.h
 durante el invierno de Montevideo.

Verano oeste 8 m²/143 ~ 0,056
 Aceptable con protección ext.



2a. PROPUESTA	Conjunto	Unidad + comprom.	Unidad -comprom.
Area expuesta	1774	96	42
Volumen int.	5258	143	14,1
A.Trans.(23%Apiso)	456	12,4	12,4
f (1/M)	0,34	0,67	0,30
Rm (m ² °C/W)	0,26	41,30	
TIM (*)	16,4	14,4 *	17,2

* Para alcanzar 16°C disponiendo 8 m de ventanas al oeste (1 W/m³), Rm deberá ser 0,45.
 Esto se consigue por ejemplo, con Rtecho = 1,4 y Rparedes = 0,6

Figura 1. Ejemplo de análisis de propuestas alternativas de forma/organización.

5. CONCLUSIONES.

El método permite el ajuste de las primeras ideas de proyecto -conformación, transparencia, orientación- teniendo en cuenta las consecuencias térmicas interiores en un clima dado. Su aplicabilidad en la enseñanza permite pensar en su incorporación a la práctica profesional y en su uso para prescripciones reglamentarias. Se adecua a los climas templados, admite fáciles ajustes a climas locales y a diferentes probabilidades de ocurrencia.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

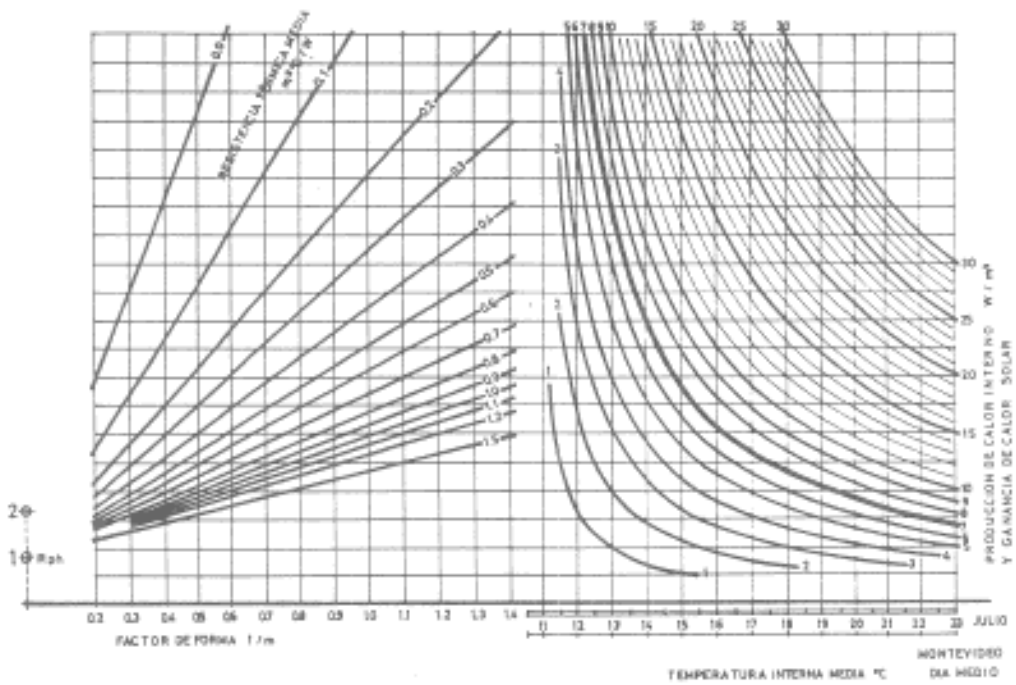
- SCAA Exigencias mínimas de habitabilidad térmica - la. etapa. Montevideo. 1989.
- MILBANK, N.O y HARRINGTON-LINN, J. Thermal response and the admittance procedure. BRE Current Paper 61/74. Londres, 1974.
- ECHEVERRIA, C. Programa SETI.SCA Manual de uso y listado. Publicación interna SCAA. Montevideo, 1992.
- GORGA, A y MARTINEZ, C. 'Temperatura del aire en Montevideo. SC.16 Facultad de Arquitectura. Montevideo, 1990.

7. ANEXO

PLANTILLA DE EVALUACION GLOBAL - MONTEVIDEO

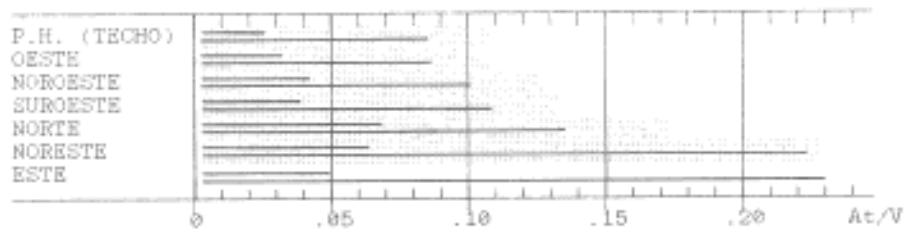
DATOS Área expuesta (m²) = (1)
 Volumen interior (m³) = (2)
 Área de ventanas y puertas al ext. (m²) = (3)
 FACTOR DE FORMA f = $\frac{(1)}{(2)}$ = (4)
 RESISTENCIA TÉRMICA MEDIA Rm = $\frac{(1-3) \times 0,35}{(2)}$ = (5)

INVIERNO TEMPERATURA INTERNA MEDIA EN JULIO
 para una producción de calor interior estandar de 7 W/m³
 Transportar el encuentro de valor de f (4) con la recta Rm (5)
 hasta la producción de calor estandar 7 W/m³. Se lee TIM en
 la escala inferior. Ejemplo: f=1; Rm=0,5; TIM = 14,3 °C



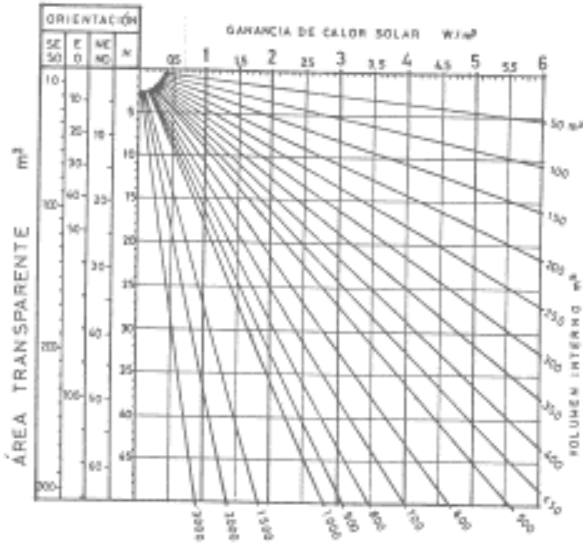
Si TIM ≥ 16 °C ACEPTABLE conformación y áreas de ventanas.
 Si TIM < 16 °C CORREGIR conformación, reducir áreas de ventanas o
 aumentar resistencia de los cerramientos opacos.
 Si 14 ≤ TIM < 16 °C Se puede tener en cuenta las GANANCIAS DE CALOR
 SOLAR por los cerramientos transparentes.

VERANO RESTRICCIÓN AL ÁREA DE CERRAMIENTOS TRANSPARENTES
 para evitar grandes fluctuaciones térmicas. Inercia Normal.
 sin prot.ext. _____ con prot.ext. _____ y vent.cruzada



GANANCIAS DE CALOR SOLAR POR CERRAMIENTOS TRANSPARENTES EN INVIERNO.

Transportar el Área transparente leída en la orientación, hasta intersectar la recta del volumen. Leer en abscisas la ganancia de calor solar (W/m^2). Ejemplo: ventanas al NE de $15 m^2$; volumen interior $250 m^3$; Ganancia de calor = 2,6



CONSUMO DE ENERGÍA DURANTE EL INVIERNO PARA OBTENER $T_{int}=16^{\circ}C$ Montevideo

$$E \text{ (kW.h)} = \text{Calor que falta (W/m}^2) \times 2,47 \times \text{Volumen Int. (m}^3)$$

Ejemplo: volumen interior de $250 m^3$; faltan $3 W/m^2$ para $16^{\circ}C$
 $E = 3 \times 250 \times 2,47 = 1825,5 \text{ kW.h}$

RESISTENCIA TÉRMICA MEDIA R_m Exigencia mínima en PAREDES $\geq 0,33 m^2 \cdot C/W$
 TECHOS $\geq 0,52 m^2 \cdot C/W$

La resistencia térmica intrínseca de cada cerramiento debe ser convertida en el valor de U que indica el gráfico. Los cerramientos transparentes tienen $R = 0$, luego $U = 6,25$

Tipo cerram.	Res. térm. ($m^2 \cdot C/W$)	U	Área (m^2)	A.U
vidrio	0	6,25x	=	

$$\frac{\sum A}{\sum A \cdot U} = \frac{\text{Área}}{\text{U} \cdot \text{Área}} = \frac{1}{U} = \frac{1}{6,25} = 0,16 = R_m$$

