

TEMPERATURA RADIANTE MEDIA: SU EFECTO EN EDIFICIOS SOLARES PASIVOS. ESTADO DE AVANCE.

Alfredo Esteves y Carlos de Rosa
LAHV - CRICYT
Calle Bajada del Cerro s/n - Parque Gral. San Martín
5500 - Mendoza
FAX: 061 380370 - E-mail: "ntcricyt@arcriba.edu.ar"

RESUMEN

La sensación térmica percibida por una persona situada en un ambiente habitable está dada por numerosas variables. Normalmente se ha tratado de mantener la temperatura de bulbo seco del aire y la humedad relativa dentro de valores para los cuales el mayor porcentaje de las personas sentirían sensación de confort, el resto de las variables ha tenido poca gravitación. Sin embargo, la temperatura real percibida es una combinación lineal de la TBS del aire y la Temperatura Radiante Media (TRM).

En el presente trabajo se indica el estado de avance de un proyecto que pretende explicar en que condiciones puede aumentarse la TRM respecto de la TBS en vivienda solares pasivas. Además se incluye una metodología para calcular los factores de forma de ambientes prismáticos que tiene la ventaja de no depender de la posición del plano y el coeficiente de correlación supera el 95% .

INTRODUCCION

El confort general de una persona que se encuentra en un espacio interior depende de varios factores entre los cuales puede mencionarse (1):

- . Factores Higrotérmicos
- . Factores Acústicos
- . Efectos del color y la visión
- . Factores de higiene
- . Factores conectados a la rutina del día

La adaptación del organismo humano a un ambiente es un proceso complejo en donde estos factores actúan en forma conjunta. De todos ellos, los factores higrotérmicos son lo que más influyen en el confort térmico y en ellos centralizaremos nuestra atención. A pesar de que la sensación térmica de un ambiente se capta mediante los sentidos, éstos actúan además, a través de pautas socioculturales (costumbres, hábitos) y de acuerdo al estado o disposición psicológica del individuo. Sólo analizaremos aquí los factores que modifican las variables físicas en relación a una condición fisiológica dada.

Las variables involucradas en el confort térmico se pueden resumir en la siguiente tabla:

Variables fisiológicas: - Nivel de actividad

Variables ambientales: - Temperatura de bulbo seco del aire (TBS)
- Temperatura Radiante Media (TRM)
- Humedad relativa (HR)
- Velocidad del aire circundante (Va)
- Radiación solar (RS)

- Otras variables
- Nivel de vestimenta (NV)
 - Posición: parado, sentado, etc.

Veamos brevemente a que se refiere cada una de ellas:

El nivel de actividad tiene que ver con el mayor o menor calor producido por el organismo, que es necesario disipar al ambiente para mantener la temperatura constante del cuerpo. Se mide en W/m^2 .

La temperatura del aire (TBS), tiene influencia en el intercambio convectivo desde la superficie del cuerpo hacia el ambiente que lo rodea. Su valor tiene una importancia clave para el confort pero hay que tener claro que a igualdad de TBS, la sensación de confort puede ser modificada fuertemente por la influencia de otras variables: TRM, nivel de actividad, nivel de vestimenta.

La temperatura radiante media, tiene que ver con la temperatura de los elementos sólidos que rodean a la persona.

La temperatura radiante media se define en relación a una persona, en una postura dada y con un nivel de vestimenta determinado como la temperatura uniforme de un entorno ideal que actúa como un cuerpo negro el cual produce la misma pérdida de calor radiante que la persona bajo consideración.

La cantidad de vapor de agua medido en términos relativos a través de la humedad, influye en el confort ya que tiene influencia sobre el intercambio de calor latente.

La velocidad del viento en la época invernal que nos ocupa y cuando no existen equipos de acondicionamiento de aire centralizados (tipo FAN-COIL) puede considerarse prácticamente cero.

La radiación solar tiene influencia cuando incide directamente sobre la persona. En este caso, provee una cantidad de energía adicional, que debe tenerse en cuenta en el balance térmico.

Por nivel de vestimenta se entiende la resistencia térmica que ejerce el vestido de una determinada persona a transferir calor desde la superficie al aire. Usualmente se mide en $[cló]$ y es un elemento muy eficaz para modificar la sensación térmica.

En la Figura N° 1, se han graficado, teniendo en cuenta la ecuación de confort térmico de Fanger (2), los valores de la TRM y el nivel de vestimenta para seis niveles de actividad que permiten mantener el confort para la TBS de $16^{\circ}C$. Por ejemplo, para una vestimenta

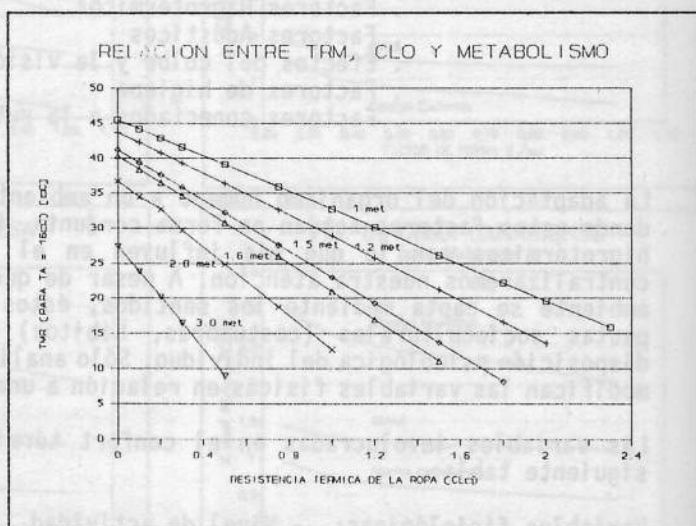


Figura N° 1: Relación entre la Temperatura Radiante Media, el Nivel de vestimenta y el metabolismo.

típica de uso en el interior de las viviendas en la época invernal como puede ser entre 0,8 y 1,2 cló y para un nivel de actividad de 92 W/m², la TRM puede variar entre 25,5 y 17 para mantener las condiciones de neutralidad térmica.

El nivel de vestimenta en este caso constituye una solución importante y efectiva para mejorar las condiciones térmicas de confort.

Esto nos indica que las condiciones de confort no sólo pueden alcanzarse modificando la TBS del aire, también influyen la TRM y el nivel de vestimenta.

La Tabla N°1, expresa la relación entre el nivel de actividad, el nivel de vestimenta y el rango de temperatura operativa para distintos tipos de actividad (3).

ACTIVIDAD	TASA DE METABOLISMO [mets]	VESTIMENTA [cló]	RANGO DE TEMPERATURA OPERATIVA [C]
Acostado:			
1- Normal	0,8	2,2	18 ± 3
2- Patológico	0,7	1,0	26 ± 1,5
Sedentario	1,0	1,5	20 ± 2,5
Trabajo:			
1- Liviano	2,0	1,0	16 ± 3
2- Pesado	3,0	1,0	10 ± 4
Higiene personal	1,4	0,0	27 ± 1
Fisioterapia	1,2	0,5	25 ± 1,5
Preambulación	1,2	2,2	14 ± 4

Es de destacar que estos valores son válidos para el 80% de las personas en confort y que la temperatura operativa es una combinación lineal de la TBS y la TRM.

Como se puede apreciar, el rango de temperatura de confort dependerá de la actividad y el nivel de vestimenta. En general, a mayor nivel de vestimenta, aumenta el rango de temperatura para las cuales el 80 % de las personas se siente en confort.

La temperatura operativa se puede obtener de acuerdo a la siguiente expresión (4):

$$Top = \alpha.TBS + (1-\alpha).TRM$$

El valor de α depende de la velocidad del aire circundante y lógicamente mientras mayor sea la velocidad del aire, mayor será la influencia de la TBS en la temperatura operativa. Su valor (4), se indica en la Tabla N° 2.

Como vemos el proyectista puede manejar la TBs tanto como la TRM sólo que la variación de la TRM no se conoce aún.

En las viviendas solares, la temperatura de los elementos sólidos que rodean

Tabla N° 2

Va [m/s]	0,05	0,10	0,20	0,30	1,00	4,00
α	0,43	0,51	0,58	0,63	0,74	0,84

al ambiente es mayor que en las viviendas no solares y por consiguiente según la hipótesis del proyecto debería considerarse en el diseño, más aún, es probable que tenerla en cuenta signifique una sobreinversión menor.

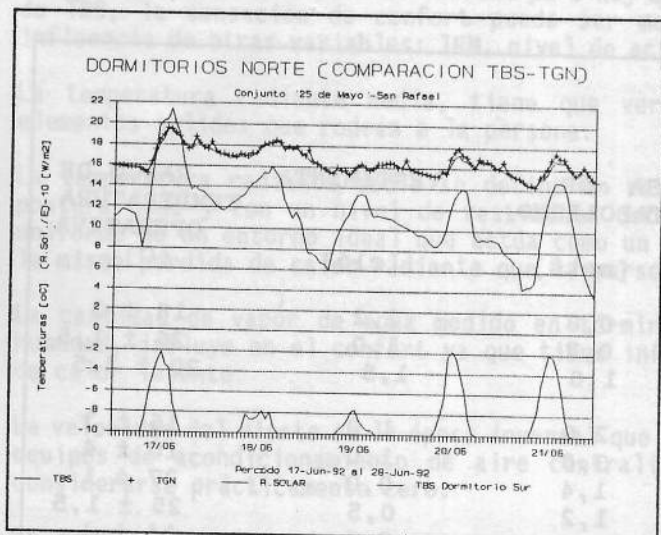


Figura N° 2

En la Figura N° 2 se indican los resultados de medir la temperatura de globo negro y la TBS en el interior de una vivienda construida por el IPV-Mendoza.

El local corresponde a un dormitorio con orientación principal y aventanamiento al Norte, con muros de ladrillón y techo liviano de resistencia térmica insuficiente ($K= 1,23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$). Además posee una relación AC/AP de 8,4%. Como se puede observar, la diferencia entre la TGN y la TBS no resulta significativa. Las características de conservación existentes hacen que los elementos que rodean el ambiente posean temperaturas mas bajas.

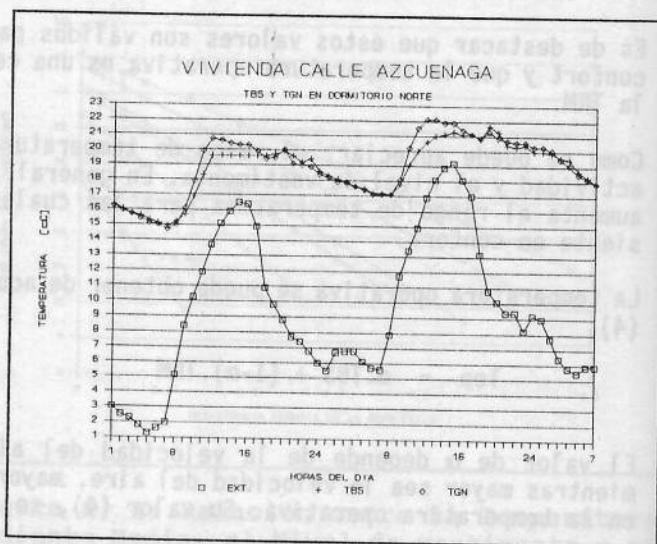


Figura N° 3

La Figura N° 3, corresponde a una vivienda con muros de ladrillón aislamiento térmica ($K=2,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$) y con techo liviano, con buenas características de conservación de energía ($K=0,67 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$) y además el área de aventaamiento al Norte, resulta ser superior al caso anterior (relación AC/AP = 1 %). Es importante indicar que en este caso, el acimut de la fachada encuentra desplazada desde el Norte 18° hacia el Este. Como se puede observar, en horas en que el asoleamiento ingresa en el ambiente interior, TGN resulta ser superior a la TBS. En horas de la noche, el valor de la acompaña el valor de la TBS.

La Figura N° 4, corresponde a un ambiente grande, es el aula de una escuela que ha sido refuncionalizada. La orientación no ha resultado ser la óptima, la fachada principal donde se encuentran los sistemas solares pasivos de ganancia directa y muros acumuladores se encuentra a 33° desplazado del Norte hacia el este. En este caso, la diferencia entre la TRM y la TGN se despegue durante el día y se reduce a cero durante la noche, pero su efecto resulta ser menor que en el caso de una orientación mas apropiada.

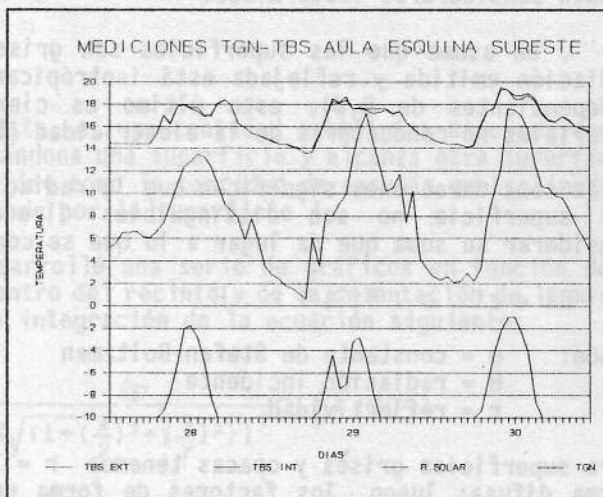


Figura N° 4

Vemos que la diferencia TGN - TBS crece cuando las condiciones de conservación de energía son mejores y además cuando el acimut de la fachada donde encuentra el sistema solar se acerca a 180° .

Es importante de acuerdo a las consideraciones anteriores, tratar establecer cuáles son las condiciones en las cuales la temperatura radiante media mantiene una diferencia positiva con respecto a la TBS de modo resulte en un aumento de las condiciones de confort respecto al consideramos si tomamos en cuenta solamente la TBS.

Veamos de que depende la temperatura radiante media y como podemos calcularla en cada situación.

TEMPERATURA RADIANTE MEDIA

Para una persona en un ambiente cerrado, en la cual la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y las superficies del entorno es pequeña, el intercambio de calor por radiación depende de la TRM. De acuerdo a la definición de la TRM anteriormente dada, se puede decir que:

La postura juega un rol determinado. La TRM no será la misma respecto a una persona sentada o parada. Además es necesario conocer la localización y orientación ya que la TRM variará punto a punto dentro de la habitación y una orientación acimutal del cuerpo.

Si hablamos de radiación normal de larga longitud de onda (baja temperatura) la absorptancia resulta igual a la emitancia y para la piel y telas normales

se aproxima a la unidad.

La evaluación de la TRM se dará para una persona ubicada en un ambiente rodeado de N superficies, consideradas isotérmicas, con temperaturas $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ ($^{\circ}K$), con emitancias $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ y factores de forma entre la persona y las superficies $F_{p-1}, F_{p-2}, \dots, F_{p-n}$.

Si alguna de las superficies dadas no son isotérmicas, debería subdividirse en superficies más pequeñas, de modo que cada una de las mismas puedan considerarse isotérmicas.

Se asume que las superficies son grises ($\epsilon = \alpha$) y además que la radiación emitida y reflejada está isotrópicamente distribuida (ϵ y α son independientes de θ, ϕ), esto último es cierto para la mayoría de los materiales no conductores de la electricidad (5).

Estas consideraciones significan que la radiación emitida y reflejada desde una superficie no son distinguibles direccionalmente, luego, podemos considerar su suma que da lugar a lo que se conoce como "radiosidad", B :

$$B_i = \epsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 + r \cdot H$$

donde: σ = constante de Stefan-Boltzman
 H = radiación incidente
 r = reflectividad

Para superficies grises y opacas tenemos $r = 1 - \epsilon_i$ y B_i es distribuida en forma difusa; luego, los factores de forma pueden calcularse en la forma habitual. Considerando que las N superficies del ambiente tienen radiosidades B_1, B_2, \dots, B_n , obtendremos por definición de la temperatura media radiante la siguiente expresión:

$$\epsilon_p \cdot \sigma \cdot (TRM^4 - T_{cl}^4) = \epsilon_p \cdot [B_1 \cdot F_{p-1} + B_2 \cdot F_{p-2} + \dots + B_n \cdot F_{p-n}] - \epsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{cl}^4 =$$

donde ϵ_p = emitancia de la persona
 T_{cl} = temperatura exterior de la persona
 F_{p-n} = factor de forma entre la persona y la superficie n

Esta expresión anterior indica que, el calor radiante transferido a la superficie del sujeto desde un entorno imaginario, considerado como cuerpo negro, que permanece a una temperatura uniforme (temperatura radiante media, TRM) debe ser igual a la parte absorbida de toda la radiación incidente real de las N superficies, menos, la radiación emitida desde el cuerpo humano. De allí:

$$T_{mrt}^4 = (1/\sigma) \cdot [B_1 \cdot F_{p-1} + B_2 \cdot F_{p-2} + \dots + B_n \cdot F_{p-n}]$$

Como puede observarse T_{cl} no tiene incidencia en la TRM

El problema consiste en determinar las radiosidades desconocidas ya que la misma no sólo depende de la temperatura y emitancia de la superficie conocida, sino también, de la radiación incidente desde todas las demás superficies. Estas deberán calcularse por medio de un análisis total del campo radiante.

Como la mayoría de los materiales de construcción tienen una alta emitancia, se puede despreciar las reflexiones asumiendo que todas las superficies en el

recinto son negras.

Luego:

$$T_{mrt}^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_n^4 \cdot F_{p-n}$$

Como se puede observar, es necesario contar con los factores de forma respectivos. Veamos cómo se logra su evaluación.

FACTOR DE FORMA

También llamado factor de vista, es una cantidad geométrica asociada con la cantidad de radiación que abandona una superficie y alcanza otra superficie. El factor de forma F_{ij} se define como la cantidad de energía que saliendo de la superficie i es interceptada por la superficie j .

Para calcularlo, Fanger, desarrolló una serie de gráficos en función de la localización de la persona dentro del recinto y de la orientación de la misma. Estos gráficos responden a la integración de la ecuación siguiente:

$$F_{A-P} = \frac{1}{\pi} \iint \frac{f_p}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{y}\right)^2 + \left(\frac{z}{y}\right)^2}\right)^3} d\left(\frac{x}{y}\right) \cdot d\left(\frac{z}{y}\right)$$

donde: f_p es el factor de área proyectada (2) y z , la distancia desde la persona al plano y x e y las dimensiones del plano.

Posteriormente, Cannistraro (6), presenta un simple algoritmo para su cálculo, a partir del trabajo de Fanger, que responde al grupo de ecuaciones siguientes:

$$F_{P-A} = F_{sat} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{a}{c}\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)}\right) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{b}{c}\right) \cdot \left(\frac{1}{\gamma}\right)}\right)$$

donde:

$$\tau = A + B \left(\frac{a}{c}\right)$$

$$\gamma = C + D \left(\frac{b}{c}\right) + E \left(\frac{a}{c}\right)$$

En el presente trabajo se propone trabajar con la relación de áreas existente entre una esfera elemental y el plano finito. Esto independiza la situación de que si el plano es vertical u horizontal o si está por encima o por debajo de la persona en cuestión. La expresión propuesta es la siguiente teniendo en cuenta los datos de la Figura N° 5:

$$F_{ij} = \frac{1}{4\pi} \operatorname{sen}^{-1} \frac{x \cdot y}{\sqrt{(1+x^2+y^2+x^2 \cdot y^2)}} \quad \text{donde:} \quad x = \frac{L_1}{D}; \quad y = \frac{L_2}{D}$$

Los resultados obtenidos con la metodología propuesta, se han comparado con los obtenidos con la metodología de Fanger y el resultado en cuanto a los valores del factor de forma se indican gráficamente en la Figura N° 6. El coeficiente de correlación para esta relación alcanza el valor de 0,975.

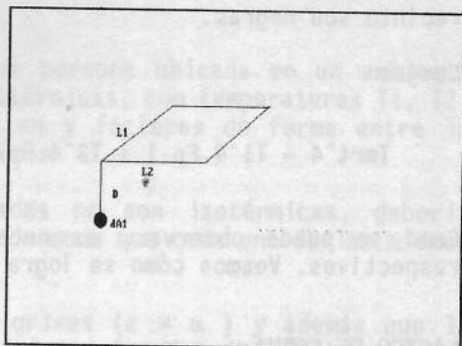


Figura N° 5: Esquema de cálculo para la metodología propuesta.

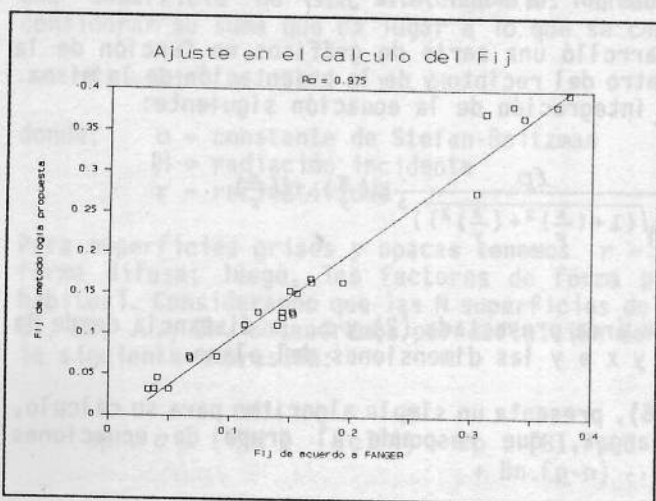


Figura N° 6:

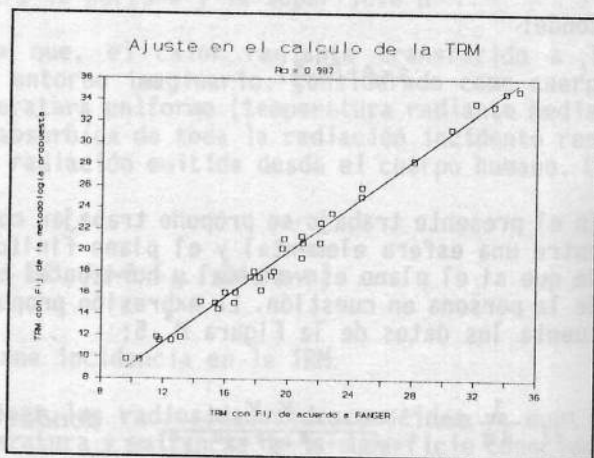


Figura N° 7

TAREAS A DESARROLLAR

Hasta aquí, se ha comentado las tareas realizadas dentro del programa investigación. En el tiempo que sigue se pretende:

- 1 - Desarrollar un programa de cálculo de la TRM en distintos puntos de local y con frecuencia horaria.
- 2- Realizar mediciones controladas de modo de poder ajustar los resulta del modelo. En este sentido, se encuentra en reconstrucción un box ensayos de 3,3 m x 3,5 m. En él se espera probar distintas situacio que influyen en el valor de la TRM interior: área colectora, niveles conservación de energía, orientación y admitancia térmica de materiales utilizados en su construcción.
- 3- Una vez ajustado el modelo, se realizarán corridas de modo de deter nar las condiciones en las cuales se obtiene un determinado valor TRM. Estos resultados se prevén volcarlos en ábacos indicativos de m de poder determinar luego, en la etapa de anteproyecto, el va esperado de la temperatura operativa en el interior del edificio.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Gobierno de Mendoza, que ha financiado parcialme el presente proyecto.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Monnier Eric. Le Comfort Thermique: Motivations et Comportaments Habitants. *CSTB. 1986. Cahier N° 2054.*
- (2) Fanger P.O.. Thermal Comfort. *Danish Technical Press, Copenhagen.197*
- (3) European Passive Solar Handbook (Preliminary Edition). *Commission of European Communities. Cap. III.*
- (4) Audoin, P.; Berger X.; Pause, P.; Schneider M. Etude d'Ambiances Rayonnement. *CSTB. 1981. Cahier N° 218.*
- (5) Incropera F., De Witt, D. Fundamentals of Heat Transfer. *John Wiley & So 1981. Cap 12.*
- (6) Cannistraro, G.; Franzitta G.; Giaconia C.; Rizzo G. *Energy and Buildin 19 (1992) 51-60.*