

ANÁLISIS TÉRMICO Y RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE CASAS SOLARES PASIVAS Y LA DIFUSIÓN DE VIVIENDAS SUSTENTABLES

Ernst Müller – ernstm@uni-kassel.de (Mueller.Ernst@gmail.com)
Universidad de Kassel (Alemania), Laboratorio de Construcción Experimental

Resumen. *El diseño de casas solares pasivas representa una estrategia prometedora para mejorar las condiciones de confort térmico en viviendas de la zona central de Chile y así constituye una opción importante para viviendas sustentables en la región. Un objetivo principal de este trabajo fue elaborar propuestas detalladas para el diseño de casas con calefacción solar y refrigeración pasiva, que permitieran optimizar el equilibrio complejo entre las diversas exigencias de un clima mediterráneo con sus veranos calurosos y secos e inviernos fríos aunque bastante soleados. Se calculó de forma dinámica el comportamiento térmico de una serie de viviendas modelo a nivel horario durante un año típico completo con un programa de simulación térmica. Los datos climáticos necesarios fueron preparados con una metodología propia, porque tal año no estaba disponible para Chile. De esta forma, se evaluó tanto varios tipos de construcciones livianas, de ladrillo y tierra, sin y con aislamiento térmico, como casas convencionales y construcciones alternativas con diferentes estrategias de climatización pasiva para las épocas calurosa y fría. Las recomendaciones de diseño de trabajos anteriores fueron verificadas con simulaciones térmicas de casas completas, considerando una mayor gama de estrategias de calefacción solar. Así fue posible presentar propuestas comprobadas de diseño pasivo con soluciones simples y materiales locales de menor contenido energético y costo. Eso demuestra, que con un diseño optimizado se puede mejorar de forma significativa el confort térmico de viviendas con construcciones económicamente accesibles en la región. Finalmente se discute desafíos y posibilidades para la difusión la arquitectura solar y sustentable. Las metodologías y el enfoque desarrollados son transferibles para otras regiones y zonas de América Latina. De esta forma la investigación aporta al mejoramiento del confort térmico y al aprovechamiento de la energía solar en la vivienda como elementos esenciales de un proceso de desarrollo sustentable.*

Palabras-clave: *Energía Solar, Casas Solares, Diseño Pasivo, Simulación Térmica, Arquitectura Sustentable*

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Uso pasivo de la energía solar y desarrollo sustentable

La climatización pasiva y el aprovechamiento pasivo de energía solar en la vivienda - refrigeración y calefacción - son estrategias prometedoras para el diseño de viviendas sustentables, tanto en países ricos como en vías de desarrollo: permiten el mejoramiento de las condiciones de confort térmico a bajo costo tanto ecológico como económico y por lo tanto viable a largo plazo y accesible para la mayoría de las personas. Para impulsar la realización de este potencial de desarrollo, todavía poco aprovechado en los países de América Latina, fue realizado un proyecto internacional de investigación y cooperación.

El desarrollo tecnológico y la difusión de conceptos para viviendas sustentables tienen especial importancia para los países de América Latina como Chile (o p.ej. Brasil) que están experimentando un proceso de crecimiento económico, que ha incrementado el consumo energético y está abriendo espacios para la reducción de la pobreza aunque esta todavía esté lejos de ser superada.

1.2 Clima

Este trabajo parte del clima del interior de la zona central de Chile, que cuenta con un clima de tipo mediterráneo de acuerdo con la Norma Chilena (NCh 1079). Este clima es interesante porque combina los problemas térmicos de una época calurosa (temperaturas máximas altas y radiación solar excesiva) con los de una época fría (temperaturas bajas). Al otro lado ofrece potenciales prometedores de aprovechamiento pasivo gracias a la gran variación térmica en la época calurosa con temperaturas nocturnas bajas y los buenos niveles de radiación solar en la época fría. De esta forma, la investigación fue al mismo tiempo prometedora y exigente para optimizar el equilibrio complejo entre las exigencias de las épocas calurosas y frías.

El clima y por lo tanto su análisis térmico representan una región importante, donde moran aproximadamente 40% de los Chilenos, considerando la nueva zonificación climática habitacional en (MINVU, 2000) hasta 1000m de altura.

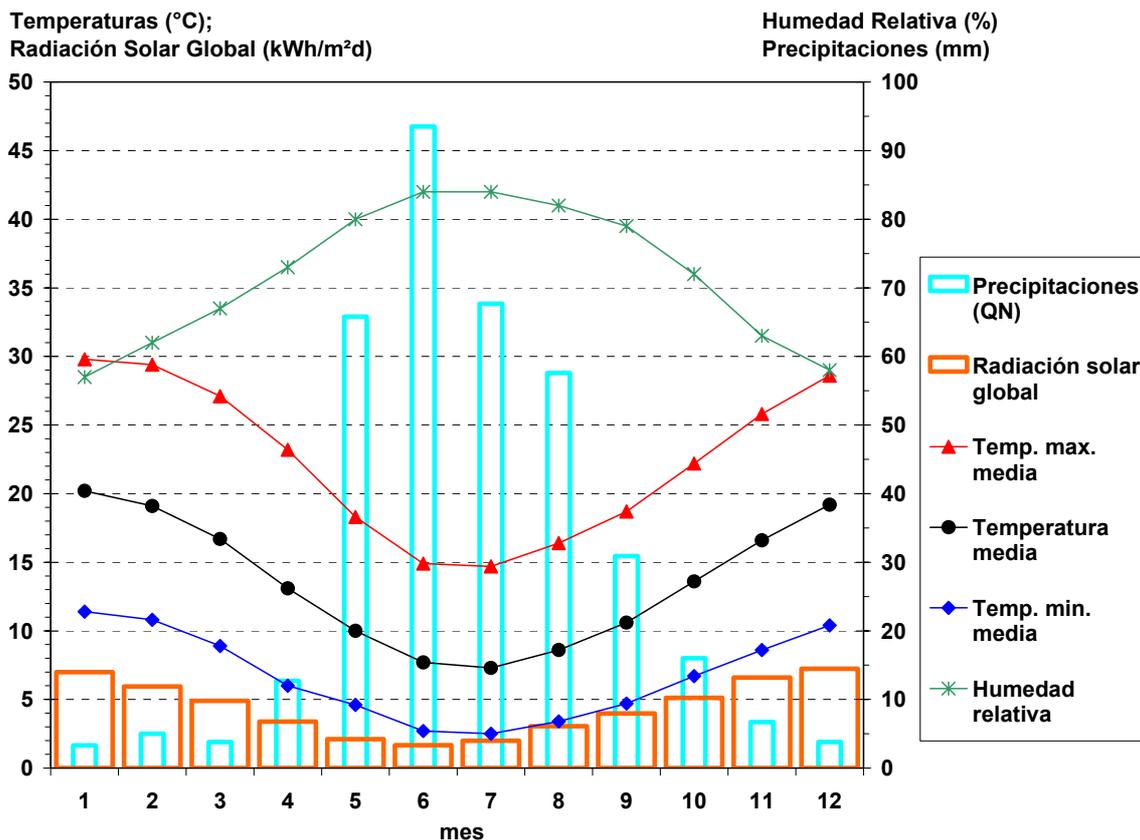


Figura 1 - Gráfico Climático para Santiago de Chile (est. Pudahuel): latitud: -33,4°; longitud: -70,8°; altura: 475 m

1.3 Antecedentes y objetivos de este trabajo

En la región considerada, raramente se puede encontrar sistemas de calefacción central o de aire acondicionado en viviendas - las tecnologías más comunes para el invierno son estufas, que frecuentemente emiten el humo para dentro de la vivienda con todos los problemas de salud y confort que eso significa, y ventiladores para el verano, aunque no todas las personas dispongan de los recursos necesarios. Por eso, "pasivo" aquí significa la ausencia de sistemas mecánicos de calefacción y refrigeración sin prometer condiciones de confort térmico perfecto en todos los momentos, como se esperaría en países ricos. Uno de los objetivos principales de la investigación fue elaborar recomendaciones y herramientas para el diseño de viviendas con calefacción solar y climatización pasiva, que permitan optimizar y entender mejor el equilibrio complejo entre las exigencias de verano e invierno en un clima mediterráneo.

Con el objetivo de la sustentabilidad se priorizó el uso de materiales de construcción locales de menor contenido energético y costo, como por ejemplo el tapial (tierra apisonada) dentro de un sistema de construcción sismorresistente.

Primeros resultados presenté en (Müller, 2002) como "Manual de diseño para viviendas con climatización pasiva", orientado en la aplicación práctica con los siguientes capítulos principales:

- 1 Introducción a la climatización pasiva
- 2 Herramientas para el diseño pasivo
 - 2.1 Herramientas tradicionales de diseño pasivo y comparación de métodos de diseño
 - 2.2 Herramientas simples
 - 2.3 Simulación térmica
 - 2.4 Herramientas de cálculo para la estimación del confort térmico en verano e invierno
- 3 Recomendaciones de diseño pasivo
- 4 Instrucciones para el uso de las herramientas de cálculo para el confort térmico

El aspecto de las herramientas de cálculo y métodos de diseño fue profundizado después como parte del trabajo en la tesis de doctorado del autor. El concepto de los parámetros térmicos cruciales, independientes del tamaño de una construcción, fue derivado de más de 500 simulaciones térmicas de un ambiente dentro de una casa y permitió formular recomendaciones de diseño para las estaciones calurosas y frías, expresados por los siguientes parámetros:

- la **relación entre ganancias y pérdidas térmicas**, que describe la fuerza relativa de las ganancias de calor en comparación con las pérdidas; debe ser minimizada en la época calurosa y maximizada en la época fría;
- el **constante de tiempo**, que describe la velocidad con la cual una construcción responde a las influencias térmicas variables (externas e internas) y por cuanto tiempo dispone de capacidad térmica para compensarlas: tiene que ser suficientemente grande para cumplir su función de forma eficiente y permitir un factor de utilización alto;

- el **factor de utilización**, que describe la eficiencia de una construcción en el aprovechamiento de las ganancias solares e internas sin que la vivienda sobrepase la temperatura máxima de confort térmico: tiene que ser lo más alto posible en ambas épocas extremas para minimizar la "relación entre ganancias excesivas y pérdidas térmicas" en la época calurosa y maximizar la "relación entre ganancias efectivas y pérdidas térmicas" en la época fría.

Las herramientas simples de cálculo térmico junto con estos parámetros cruciales, su desarrollo, análisis y las recomendaciones son descritos con mayor detalle en (Müller, 2006) y (Müller, 2007).

Entonces, el objetivo del presente trabajo es verificar las recomendaciones de diseño, derivados de simulaciones térmicas de un solo ambiente y especialmente del método de los parámetros cruciales, con simulaciones térmicas de casas completas. Además, algunos elementos importantes de calentamiento solar para la época fría no pudieron ser considerados con métodos simples de cálculo ni (de forma explícita) en el método de los parámetros cruciales, porque dependen críticamente tanto de la relación geométrica complicada y variable entre la posición solar y la geometría de una construcción como del comportamiento térmico dinámico: el invernadero y el muro Trombe. Por todo eso fue necesario realizar comparaciones con simulaciones térmicas para casas completas y analizarlas detalladamente. De esta forma, ahora puedo presentar propuestas evaluadas y verificadas de diseño pasivo para viviendas.

2. METODOLOGÍA

2.1 Simulaciones térmicas

El método principal de investigación lo constituyeron simulaciones térmicas horarias de una vivienda unifamiliar de dimensiones típicas con el programa DEROB-LTH de la Universidad de Lund (Suecia). Este programa considera de forma detallada tanto las variables climáticas y arquitectónicas como el perfil de uso con las ganancias térmicas internas. Como resultado, DEROB-LTH permite obtener valores horarios de las temperaturas internas de aire y de las temperaturas operativas, definidas como el valor promedio de la temperatura de aire interior y de la temperatura promedio de las superficies interiores que deslindan el mismo espacio. Además, calcula de forma dinámica los flujos de energía radiante y térmica. DEROB-LTH ofrece la ventaja de haber sido usado y adaptado anteriormente en la Universidad de Lund para su aplicación en climas calurosos.

2.2 Datos climáticos

Los datos climáticos requeridos, tipo TRY ("Test Reference Year"), no estaban disponibles en Chile, así que fueron preparados con una metodología propia, que se puede resumir como sigue: la base forman varios años con datos climáticos horarios de temperatura y de radiación solar global. De los datos disponibles y completos de la estación La Platina en Santiago de Chile fueron seleccionados los 12 meses, que mejor correspondían a los promedios a largo plazo. En base a esta información se calculó tanto los datos horarios de radiación difusa y directa como la temperatura del cielo, necesaria para la consideración de su radiación infrarroja. La metodología fue descrita detalladamente y publicada en (Müller, 2001).

2.3 Confort térmico

Para evaluar el grado de desviación de las temperaturas de las condiciones de confort térmico fueron definidos los grados-hora diarios de calor ($> T_{base} = 26^{\circ}\text{C}$) y frío ($< T_{base} = 19^{\circ}\text{C}$). El cálculo es análogo a los grados-hora usados en cálculos tradicionales de calefacción para cualquier periodo de N Horas y aquí utiliza las temperaturas operativas, que son más significativas para la sensación de confort térmico que las temperaturas del aire. Los "grados-hora diarios" fueron calculados con un programa propio de procesamiento de datos a partir de los resultados horarios de DEROB-LTH.

$$\text{grados-hora diarios} = \left\{ \sum_{i=1}^N (T_i - T_{base}) \times 1h \right\} \times 24 / N \quad (1)$$

3. Resultados de la investigación

3.1 Diseños comparados

Todas las comparaciones de diseño se basan en una vivienda básica con un área de 62,72m². La distribución de sus espacios interiores corresponde de forma aproximada a una situación típica de vivienda popular en la zona central de Chile. En las figuras siguientes, que fueron generadas con el programa de simulación DEROB-LTH, se muestra el diseño de las casas. Las superficies "azules" sin transparentes, las "amarillas" representan elementos sombreadores (incluyendo tal efecto de muros gruesos) y los demás elementos son opacos; el techo y el cielo fueron eliminados gráficamente de las figuras para mostrar el interior y las partes traseras. Todos los diseños en las figuras siguientes se

muestra con la fachada principal vidriada orientada hacia el norte, visto desde la posición solar el 15.7. a las 14hrs (cuando la leyenda no especifica otra fecha), es decir en una situación típica del invierno.

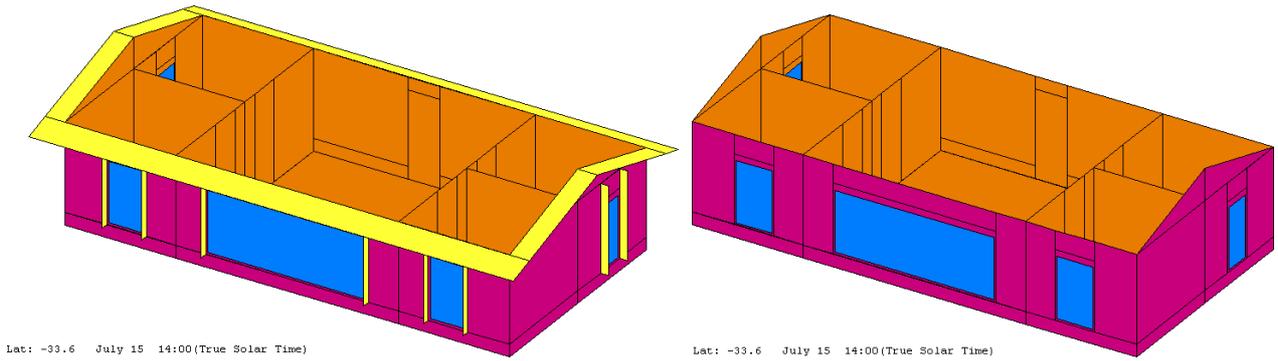


Figura 2 - Diseños de casas estándar de tapial (izq.) y normales de tabique o ladrillo (dra.) - 15.7. a las 14hrs

Las variantes de diseño simuladas comparten las siguientes **características comunes** en su orientación norte:

- piso: 7cm de hormigón sobre 8cm de ripio y 1m de tierra (como modelo);
- el techo es de fierro galvanizado ("zinc") y el cielo de 1,2cm de yeso - cartón sin o con aislante de poliestireno expandido encima; el espacio del entretecho está ventilado (2/h);
- el sobretecho en la fachada principal norte está calculado de tal forma, que ofrece sombra a las ventanas de la fachada norte en verano y pleno acceso solar en la época más fría del invierno; esto se puede verificar en las figuras de la casa estándar para el 15.1. (Figura 3) y el 15.7. a las 14hrs (Figura 2) y la casa de "ganancias directas" para el 15.1. a las 14hrs (Figura 3) y el 15.7. a las 14hrs (Figura 7); en el caso de las casas normales de tabique o ladrillo se puede observar la mayor reducción del área efectivamente visible por el ángulo solar en verano en la fachada norte en comparación con la fachada oeste (Figura 3);
- el perfil de uso considera ganancias de calor por personas y equipamientos de 15,18kWh/día con un uso diurno variable (hora solar: 7hrs~22hrs) en la sala - cocina grande central y un uso nocturno variable (18hrs~7hrs) en las cuatro habitaciones en las esquinas, incluyendo el baño en la fachada sur;
- la ventilación nocturna es de 10/h (cambios de aire por hora) de 20hrs a 6hrs de diciembre a febrero (excepción: casas normales sin ventilación nocturna);
- los muros internos y externos son pintados de color blanco con 30% de absorción (cielo 20%, piso 50%).
- en ningún caso se consideró un sistema de calefacción o refrigeración de acuerdo con la finalidad de diseño pasivo en este trabajo.

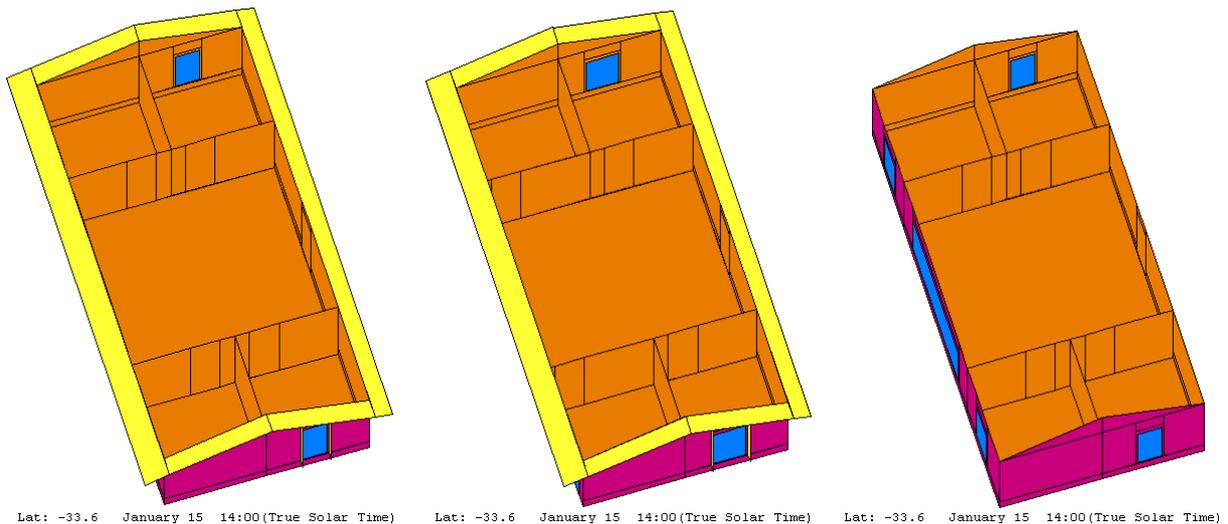


Figura 3 - Diseños de casas, vistos desde la posición solar - el 15.1. a las 14hrs: estándar de tapial (izq.), "ganancias directas" (centro) y normal de tabique o ladrillo (dra.)

Para la **construcción básica** se consideró las siguientes alternativas:

- construcción normal (convencional) de ladrillo o tabique sin aislamiento térmico: el muro de ladrillo considera ladrillos de 1200kg/m³ con 7,1cm de altura y 1,3cm de mortero de cemento; no tiene revoque exterior como es común en construcciones Chilenas simples; el tabique sin indicación de aislamiento térmico es hueco, consiste de un machihembrado de 1cm de pino exterior, 5cm de cámara de aire y 1,2cm de yeso - cartón;

los muros internos corresponden a los exteriores, pero las construcciones livianas de tabique aislado cuentan con muros internos de adobe parado para mejorar su capacidad térmica.

- tapial (= tierra apisonada) / adobe: liviano (densidad $\rho=1200\text{kg/m}^3$, conductividad $\lambda=0,47\text{W/mK}$), normal ($\rho=2000\text{kg/m}^3$, $\lambda=0,93\text{W/mK}$), con o sin aislamiento térmico externo (espesor indicado en las leyendas cuando corresponde);
- el techo es de zinc y el cielo de 1,2cm de yeso - cartón sin aislante térmico.

Las **casas normales** representan a construcciones comunes en Chile de baja calidad térmica sin ningún elemento de climatización pasiva y así sirven como referencia; se caracterizan por:

- infiltraciones de aire en la casa: 1,5/h en invierno y 3/h en verano, 2/h en el entretecho; sin ventilación nocturna;
- orientación variable (indicado en las leyendas cuando no es hacia el norte);
- sin sombreado fijo por un sobretecho;
- las ventanas tienen cortinas cerradas como protección solar móvil de día entre Noviembre y Marzo (época calurosa) de un material más simple con transmisión 20% y absorción 30%, p. ej. de tela fina de color claro;
- el techo es de "zinc" y el cielo de 1,2cm de yeso - cartón sin aislante;

Los **diseños estándar** representan construcciones comunes, pero consideran un "buen diseño térmico":

- ventanas simples de tamaño medio;
- orientación norte;
- ventilación nocturna en verano de diciembre a febrero;
- el techo es de "zinc" y el cielo de 1,2cm de yeso - cartón con 8cm de aislante de poliestireno expandido encima; este espesor corresponde a la "Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones" en (MINVU 2000).
- las ventanas tienen cortinas cerradas como protección solar móvil de día entre noviembre y marzo con transmisión 10% y absorción 20%, p. ej. de tela blanca gruesa de mejor calidad protectora.

Teniendo en mente el objetivo de demostrar y verificar diferentes estrategias y niveles de mejoramiento térmico como propuestas alternativas, solamente se consideró combinaciones congruentes de modificaciones y mejoras constructivas en los diferentes elementos constructivos. Los detalles de diseños térmicamente mejorados y pasivos serán descritos junto con su análisis.

3.2 Comparación del comportamiento térmico de diseños convencionales y pasivos

La primera figura de resultados, Figura 4, muestra claramente los problemas serios de confort térmico de las construcciones normales de tabique y ladrillo en las épocas calurosas y frías, tanto en la sala central como en el dormitorio a su lado "derecho" (visto desde el sol, véase Figura 2 y Figura 3).

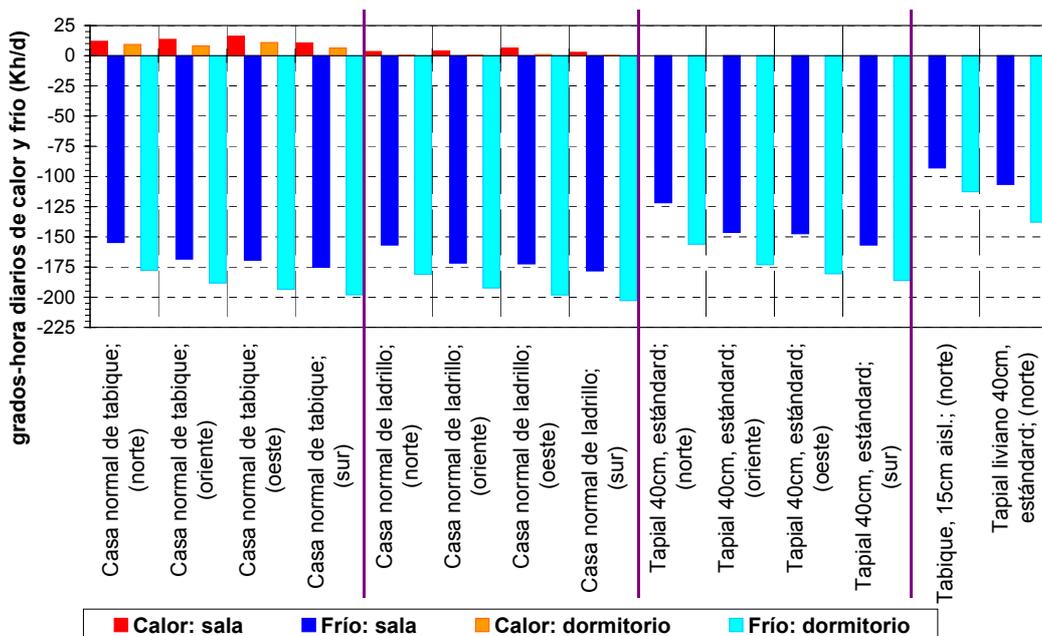


Figura 4 - Comportamiento térmico de casas normales de tabique y ladrillo, estándar de tapial y con menor transmitancia térmica: variación con la orientación

Con respecto a la orientación, se puede confirmar que la orientación norte presenta problemas algo inferiores, siendo oriente y oeste las peores en la época calurosa, debido a la mayor irradiación solar que reciben, y sur en la época fría por su falta. El ladrillo es el mejor material de construcción entre los dos, debido a la mayor capacidad térmica y menor transmitancia térmica de esta construcción.

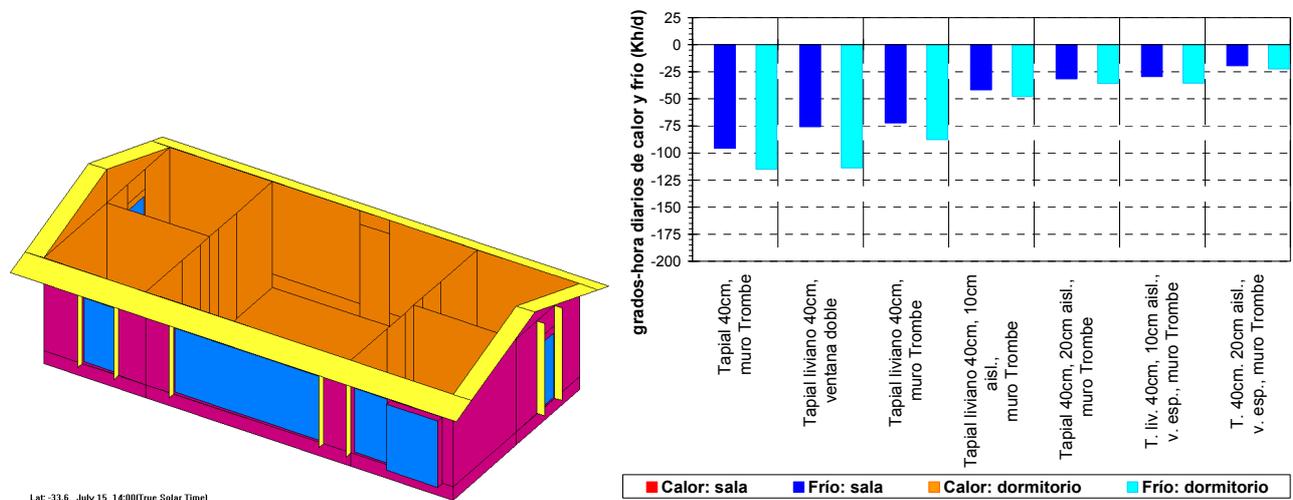
En la época calurosa, esos problemas ya se puede resolver con una construcción de tapial de muy buena capacidad térmica y las medidas pasivas simples de los "diseños estándar", que se parecen a la arquitectura vernacular en Chile (con excepción del tipo de aislante) - la combinación de una buena protección solar con una ventilación nocturna eficiente debido a la capacidad térmica alta y el control de las ganancias solares a través del techo / cielo son suficientes para resolver los problemas de esta época. Bajo las condiciones de la estación fría, los diseños estándar continúan ofreciendo condiciones inaceptables de confort térmico. La mejora significativa de las construcciones de tabique aislado y tapial liviano subraya la importancia de la transmitancia térmica en la época fría, porque el otro aspecto importante de la relación entre ganancias y pérdidas no fue modificado aquí.

Para el mejoramiento de las condiciones de confort térmico fueron analizados y optimizados las siguientes **estrategias de climatización pasiva / calentamiento solar para la época fría:**

- aislamiento térmico (muros, cielo / techo y ventanas de mejor calidad térmica);
- muro Trombe (véase diseño en Figura 5);
- invernadero adosado (véase diseño en Figura 6);
- ganancias directas (ventanales grandes al norte; véase diseño en Figura 7).

Los **muros Trombe**, instaladas en el dormitorio derecho (véase Figura 5), se caracterizan por:

- construcción de 40cm de tapial pesado ($\rho=2200\text{kg/m}^3$, $\lambda=1,4\text{W/mK}$, con agregado de ripio a la tierra para mejorar la conductividad y capacidad térmica) y 1,5cm de revoque interior de barro común ($\rho=2000\text{kg/m}^3$), para obtener valores máximos de capacidad y conductividad térmica en el muro Trombe;
- la superficie exterior del muro Trombe está pintada de negro;
- dos vidrios separados por una cámara de aire estancada;
- aislamiento lateral con 1cm de poliuretano y marco de madera de pino de 2cm; el poliuretano resiste bien a las temperaturas altas posibles dentro del muro Trombe, lo que lo diferencia del poliestireno no apto aquí;
- de abril a octubre: área de intercambio de aire con el interior correspondiente al 6% de la superficie vidriada;
- de noviembre a marzo: son sombreados y cerrados para evitar un sobrecalentamiento de la casa.



Lat: -33.6 July 15 14:00(Truc Solar Time)

Figura 5 - Casas de tapial con "muro Trombe": diseño pasivo (izq.) - comparación del comportamiento térmico (dra.)

Constructivamente, el muro Trombe solamente hace sentido como parte de una casa de tapial, donde ofrece una solución constructiva para un muro sismorresistente, que aunque sea opaco aporta ganancias solares en invierno. Además, las superficies vidriadas por lo menos disponen de ventanas dobles o de ventanas dobles especiales (de baja emisividad infrarroja). En Figura 5 se puede observar claramente como el comportamiento térmico mejora de forma significativa con el mejoramiento del nivel general de aislamiento térmico con el mismo muro Trombe. Vale la pena anotar, que en ningún caso los muros Trombe causaron problemas térmicos en verano. El efecto del muro Trombe mismo se puede derivar de la comparación del comportamiento térmico de los dos diseños de "Tapial liviano 40cm" (con ventana doble) sin y con muro Trombe: el efecto positivo en el dormitorio es notable e incluso en la sala (al lado) se puede observar un pequeño efecto positivo por los intercambios térmicos al interior de la casa. Las construcciones de tapial liviano tienen la ventaja de mejor aislamiento térmico en comparación con el tapial común sin presentar los costos y complicaciones constructivas del aislamiento térmico exterior o la falta de capacidad térmica de las construcciones en tabique, por lo tanto sirven como un punto de referencia de aquí y en adelante.

Los **invernaderos adosados** (véase Figura 6) se caracterizan por:

- adosado a la fachada norte completa (otras orientaciones harían poco sentido);
- con ventanas dobles en su fachada norte (incluyendo una puerta vidriada) y con muros opacos en sus fachadas oriente y oeste; tanto las ventanas como los muros son de la misma calidad como la propia casa; el techo del invernadero (sin espacio ático) cuenta con aislamiento térmico con el mismo espesor como el cielo de la casa;
- el muro de separación entre el invernadero y la casa es un muro pesado sin aislamiento térmico:
 - todas las construcciones de tapial: 40cm de tapial con revoque de barro de 1,5cm en ambos lados (todo con $\rho=2000\text{kg/m}^3$);
 - construcción de tabique aislado: tipo "adobe parado" - 10cm de adobe parado con revoque de barro de 1,5cm en ambos lados (todo con $\rho=2000\text{kg/m}^3$);
- las ventanas interiores de separación entre el invernadero y la casa son simples;
- la ventana norte del invernadero cuenta con fundamentos de 30cm de altura de un muro de ladrillos ($\rho=1000\text{kg/m}^3$) de 14cm de espesor sin revoque;
- en los casos de un invernadero "cerrado", las ventanas interiores siempre están cerradas; el invernadero sirve de espacio tapón para la casa y el intercambio de calor solamente se efectúa a través de la conductividad térmica relativamente alta de las ventanas simples y de los muros de separación sin aislamiento térmico;
- los demás invernaderos (sin calificación en la leyenda) realizan la ventilación de la casa completa en invierno a través de la entrada de aire por el invernadero y la eliminación del aire consumido desde los espacios habitados al exterior (correspondiendo a 0,5 cambios de aire por hora); esta ventilación se podría obtener fácilmente con 3 pequeños ventiladores de extracción de aire en la cocina (parte sur de la sala - cocina) y los dos volúmenes sur incluyendo el baño; esto significa una mejor transferencia de calor del invernadero a la casa y una reducción significativa de la pérdidas de calor por la ventilación necesaria, porque el aire ya entra precalentado por el invernadero a la casa;
- en la época calurosa, en el invernadero se aplica protección solar móvil y ventilación nocturna como en la casa misma;
- las ventanas de la casa por lo menos disponen de ventanas dobles o incluso de ventanas dobles especiales.

El efecto del invernadero adosado se puede derivar más claramente de la comparación del comportamiento térmico de los dos diseños de "Tapial liviano 40cm" (ambos con ventana doble) sin y con invernadero en Figura 6: el efecto positivo, tanto en la sala como en el dormitorio es notable. Además la mayor eficiencia del invernadero con ventilación hacia la casa en comparación con el uso "cerrado" queda clara en todas las construcciones. Además, se puede observar claramente como el comportamiento térmico mejora de forma significativa con el mejoramiento del nivel general de aislamiento térmico. De nuevo, en ningún caso los invernaderos causaron problemas térmicos en verano.

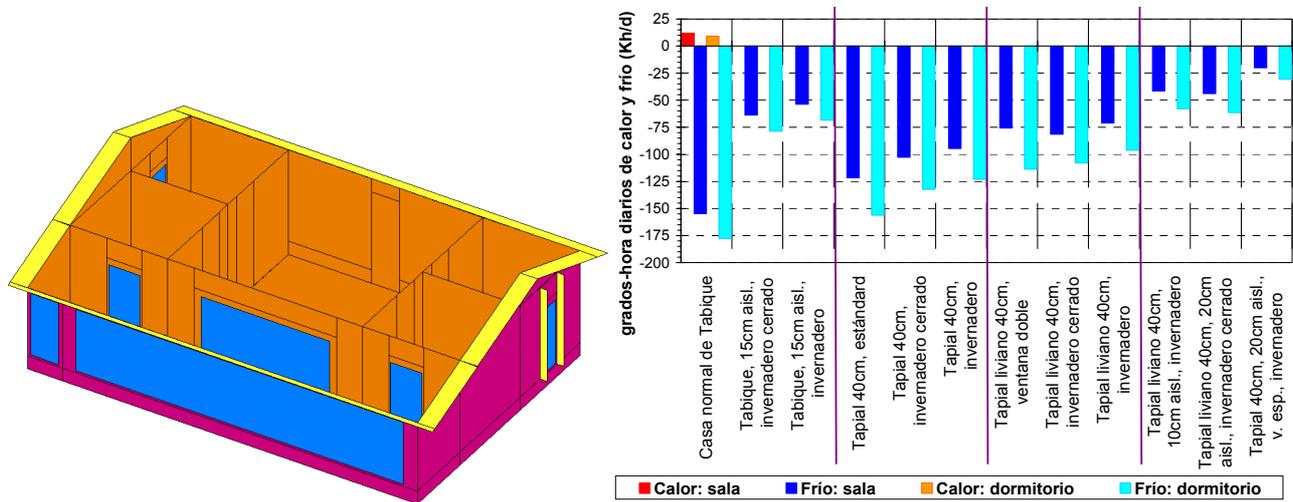


Figura 6 - Casas con "invernadero adosado": diseño pasivo de tapial (izq.) - comportamiento térmico (dra.)

Los diseños de **ganancia directa** (véase Figura 7) se caracterizan así:

- todos los muros internos son pesados: en el caso de la construcción en tabique aislado son de adobes parados con revoque de barro con un espesor total de 13cm ($\rho=2000\text{kg/m}^3$), fijados de forma sismorresistente entre una estructura de pilares de madera; en los casos de las construcciones en tapial, los muros interiores revocados incluso consisten de tapial de 43cm ($\rho=2000\text{kg/m}^3$) por razones de sismorresistencia de la casa, que exige la formación de ángulos de tapial en forma de "L" o "T" con los muros exteriores; este último significa una pérdida pequeña de espacio útil en relación al área bruto pero aumenta levemente la capacidad térmica efectiva;

- ventanas al norte: dobles normales o dobles especiales, ocupando prácticamente el total de la fachada norte con los ventanales y sus marcos.

El calentamiento solar mediante ganancia directa funciona a través de dos elementos constructivos esenciales: ventanales grandes con orientación óptima hacia el norte y una capacidad térmica suficiente para acumular el calor recibido de día para la noche, lo que permite un buen "factor de utilización" de las ganancias como descrito y comprobado anteriormente por el mismo autor en (Müller 2006) y (Müller 2007). Además, el comportamiento térmico mejora con el nivel del aislamiento térmico, pero con una excepción importante en Figura 7: la casa de "Tabique, 15cm aisl." dispone de mejor aislamiento térmico que la de "Tapial liviano 40cm", pero muestra un comportamiento térmico inferior debido a su falta de capacidad térmica y eficiencia. Con ventanas de tamaño mediano (de calidad indicada "ventana doble"), la construcción liviana predominaba gracias a su aislamiento térmico superior y su capacidad térmica suficiente para este nivel de ganancias solares menores. Al mismo tiempo, la construcción liviana es la única entre las consideradas como diseño pasivo aquí, que muestra problemas (pequeños) de sobrecalentamiento en verano.

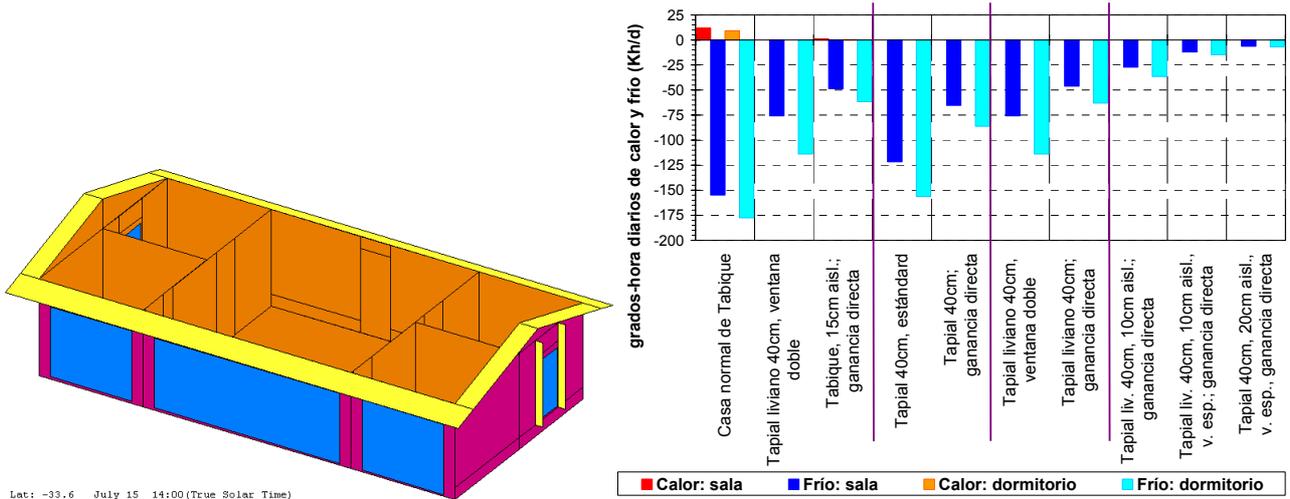


Figura 7 - Casas con "ganancias directas": diseño pasivo de tapial (izq.) - comportamiento térmico (dra.)

La última figura de comparaciones, Figura 8, muestra una selección de resultados agrupado por construcción: esto permite evaluar directamente la eficiencia de las estrategias de calefacción solar para tres tipos de construcción:

- construcción normal de tabique sin y con aislamiento (incluyendo ventanas dobles);
- construcción de tapial / adobe: liviano con ventanas dobles;
- construcción de tapial normal con 20cm de aislamiento térmico externo con ventanas especiales.

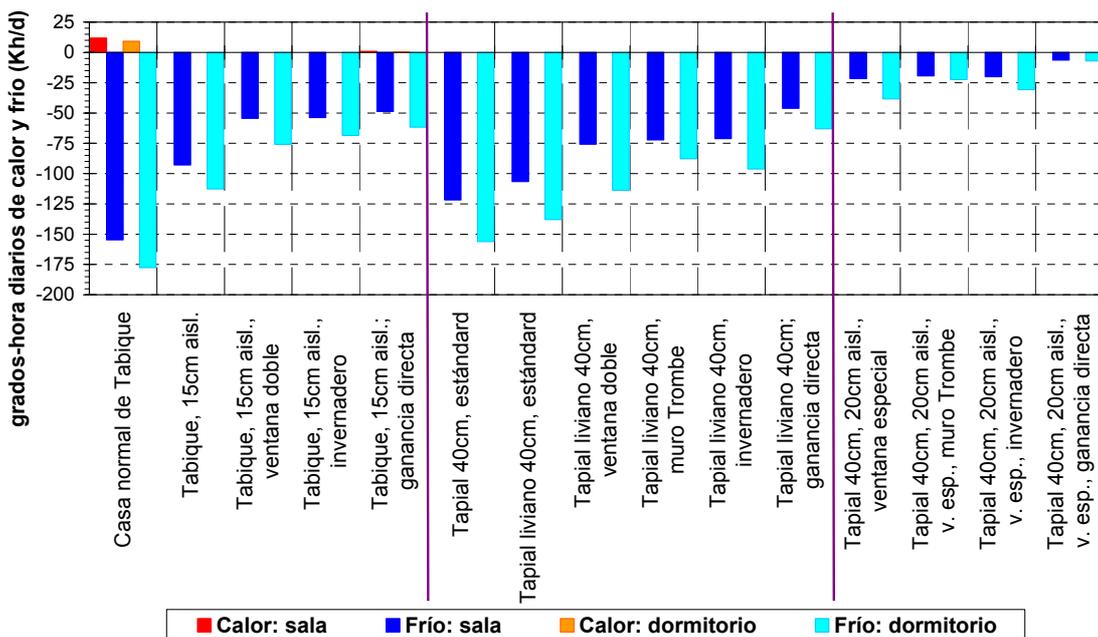


Figura 8 - Comportamiento térmico de casas pasivas de tabique y tapial: estrategias de diseño pasivo

En una construcción (demasiado) liviana, solamente se puede observar un mejoramiento significativo del comportamiento térmico con la reducción de las transmitancias térmicas con aislación térmica y ventanas dobles, pero no con el aumento de las ganancias solares. Además, este tipo de construcción muestra mayor riesgo de sobrecalentamiento en verano.

En las construcciones de tapial con buena capacidad térmica, se puede mejorar el comportamiento térmico en la época fría tanto con mejor aislamiento térmico como con un aumento de las ganancias solares. La estrategia más eficiente y al mismo momento más simple de optimizar las ganancias solares es la de las ganancias directas como se puede observar claramente en Figura 8. Contando con protección solar y ventilación nocturna, este tipo de construcciones constantemente ofrece buenas condiciones de confort térmico en la época calurosa.

3.3 Recomendaciones de diseño y conclusiones técnicas

Aunque los problemas de confort térmico sean menores en la época calurosa, representan un problema muy común y muchas veces sin solución en las viviendas de la zona central de Chile, porque los sistemas de aire acondicionado no son una solución relativamente común y accesible como por ejemplo en Brasil (para parte de las clases media y alta). Por eso es muy importante, que las soluciones pasivas indicadas aquí para esta época realmente sean implementadas de forma eficiente. Las soluciones pasivas para la época fría son mas difíciles y costosas, pero en este caso y como último recurso, los problemas restantes podrían ser complementados con sistemas de calefacción de bajo costo y bajo consumo energético.

Recomendaciones de estrategias de climatización pasiva para la **época calurosa**, ordenadas por prioridad:

- protección solar, tanto fija en la fachada norte como móvil en todas las ventanas;
- protección de las ganancias solares opacas a través del techo con aislamiento térmico del cielo como mostrado en (Müller, 2002) y (Müller, 2007);
- ventilación (nocturna) eficiente en combinación con una capacidad térmica suficiente de la construcción.

Recomendaciones de estrategias de climatización pasiva para la **época fría**, ordenados por prioridad:

- reducción de las pérdidas de calor: aislamiento térmico, ventanas de buena calidad térmica, reducción de infiltraciones excesivas de aire con un buen sellado de ventanas y puertas;
- aumento de las ganancias solares, preferentemente a través de ganancias directas;
- buen aprovechamiento de las ganancias internas y solares con una capacidad térmica adecuada.

La construcción liviana de tabique es la menos recomendable por su capacidad térmica deficiente, que resulta en problemas frecuentes de sobrecalentamiento en la época calurosa y limita la posibilidad de ganancias solares en la época fría. La construcción de tapial liviano es capaz de resolver los problemas térmicos en verano y de ofrecer un mejoramiento significativo de las condiciones de confort térmico en invierno con una construcción simple, que solamente exige una modificación de construcciones tradicionales (principalmente las ventanas dobles y el aislamiento del cielo) con una geometría y orientación optimizada. Así se presta incluso para viviendas económicas.

La construcción de tapial con aislamiento térmico externo comprueba la posibilidad de alcanzar condiciones de confort térmico casi perfectas con materiales que ya se puede encontrar en Chile, aunque sea mas en construcciones comerciales grandes, no en viviendas - pero sin la necesidad y el alto costo de manutención de sistemas de ventilación mecánica o de regulación automatizada como se puede encontrar en algunas zonas climáticas más frías (y ricas) de Europa. Así queda demostrada el potencial y la viabilidad de la arquitectura pasiva para viviendas en la zona central de Chile.

Esta investigación demostró que la climatización pasiva es una estrategia prometedora para el mejoramiento de la calidad térmica de habitaciones en América Latina: La diferencia, p.ej. con el centro o norte de Europa, es que las condiciones climáticas muchas veces permiten soluciones simples y económicas con materiales locales. El enfoque metodológico empleado de un proceso de desarrollo de alta tecnología con simulaciones térmicas para crear y respaldar finalmente soluciones técnicas simples y económicas resultó fructífero. Las metodologías desarrolladas para la elaboración de las recomendaciones de diseño y las propuestas de casas solares pasivas son transferibles para otras regiones y zonas climáticas.

De esta forma, la investigación aportó al mejoramiento del confort térmico y al aprovechamiento de la energía solar en la vivienda como elementos esenciales de un proceso de desarrollo sustentable.

4. Desafíos y posibilidades para la difusión de la arquitectura solar y sustentable

El número de trabajos sobre viviendas sustentables en América Latina está creciendo, pero su difusión real todavía deja mucho para desear. Para el/la científico, ingeniero o arquitecto que desarrolla y presenta soluciones técnicas nuevas y sustentables, esta situación presenta el desafío de pensar en posibilidades de mejor difusión y realización de sus resultados. En el caso de viviendas sustentables, la construcción de proyectos prototipos por universidades y la introducción de exigencias térmicas mínimas en una Reglamentación Térmica solamente pueden ser primeros pasos importantes, que ya se han iniciando en varios lados {véase p.ej. (MINVU, 2000)}.

Buscando respuestas a estos desafíos, los conceptos en este capítulo se fundamentan en varias experiencias propias y fuentes:

- la participación activa en las discusiones y en la fundación de una cooperativa especial en Brasil - "ARCOO - Arquitetura e Cooperativismo" - y los contactos continuados con ella desde entonces: es una cooperativa "transdisciplinar", que funciona como "Escola de Economia da Habitação" y organiza, planifica, realiza y ofrece asesoría a cooperativas de vivienda sustentables {véase "www.arcoo.com.br" - las actividades presentes mostradas allí son el mérito de los miembros activos actuales};
- en la construcción y difusión de sistemas solares con Organizaciones No Gubernamentales en zonas rurales de Chile bajo el concepto de las tecnologías apropiadas, p.ej. (Müller, E. Román, R., 1996);
- el intercambio con colegas y profesores de la misma Universidad de Kassel y sus publicaciones: p.ej. (Rosa D'Avila, 2006) y (Müller-Plantenberg, 2005); además las experiencias de las "Incubadoras Tecnológicas de Cooperativas Populares" en Brasil son inspiradoras: estas incubadoras son parte del movimiento brasileño de economía solidaria y como tal forman y asesoran a cooperativas como una ampliación novedosa de las actividades de extensión universitaria {véase (Müller-Plantenberg, 2005) y p.ej. "www.fbes.org.br", "www.acompanhamentoproninc.org.br/index.php", "www.cooperativismopopular.ufrj.br" y "www.itcp.usp.br"}.

La palabra "sustentable" es usada con cada vez mas frecuencia en la discusión pública, sin que las personas (políticos, economistas, ingenieros/as, ...) definan lo que entienden concretamente con ese concepto cada vez mas vago. Por eso es necesario - también desde un punto de vista científico - definirlo con claridad para mi trabajo: es importante, que una vivienda verdaderamente sustentable cumpla con los requisitos esenciales de las tres aspectos principales de la sustentabilidad en la vivienda, como se puede ver en Figura 9 - la pura sustentabilidad ecológica no es suficiente a largo plazo ni para la difusión en mayor escala:

- **sustentabilidad ecológica** - compatible con la estabilidad a largo plazo de los ecosistemas locales ... globales: uso de fuentes renovables de energía, bajo consumo energético para la construcción y el uso, ...;
- **sustentabilidad social** - satisfacción de las necesidades básicas de todos los seres humanos a largo plazo: vivienda saludable y térmicamente confortable para todas las personas, participación democrática de todos/as en las decisiones que afectan su vida, ...;
- **sustentabilidad económica** - viabilidad económica a largo plazo: viabilidad económica de los proyectos, costo razonable, creación de fuentes de trabajo e ingresos, preferencia para la economía local,

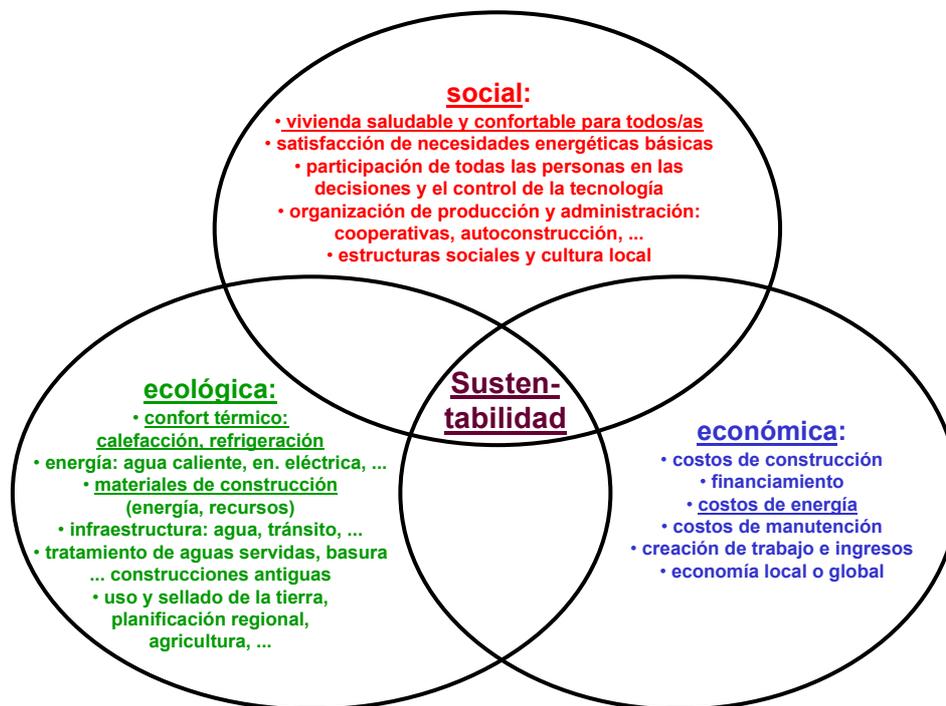


Figura 9 - Aspectos principales para el concepto de viviendas sustentables (subrayado: aspectos principales del presente trabajo)

En el caso de las **viviendas sustentables** se trata de un desafío con muchas dimensiones:

- nuevas tecnologías **ecológicamente sustentables** en muchas áreas diferentes, que exigen respaldo y afinación científicos continuados, todavía con mejores herramientas de diseño y soluciones detalladas nuevas en su realización para todas las zonas climáticas y ambientes socio - económicos diferentes - el **trabajo interdisciplinar** es imprescindible por consiguiente para su diseño y realización;

una ampliación interesante y lógica del presente trabajo sería p.ej. la integración de otras aplicaciones de la energía solar en el proyecto, especialmente el calentamiento solar de agua para sustituir del calentamiento con gas (común p.ej. en Chile y Brasil) o el calentamiento con energía eléctrica ("chuveiro elétrico" común p.ej. en Brasil) y - en zonas rurales remotas - energía fotovoltaica para comunicación, bombeo de agua y energía eléctrica en general; la orientación norte (en el hemisférico sur) de todos los diseños recomendados facilitaría estas aplicaciones;

- el uso preferencial de materiales locales y el bajo consumo energético de las casas permite reducir los costos; también existe un potencial de autoconstrucción para los diseños más simples (aquí p.ej. en tapial liviano) - todo eso aportaría tanto a la **sustentabilidad ecológica como económica**;
- difundir los conceptos y organizar la **participación** de los usuarios (futuros) en el proceso de planificación y construcción de las viviendas; también es imprescindible organizar la participación de los usuarios en el uso de las viviendas; esto p.ej. es importante para la capacitación de los usuarios en el manejo correcto de las casas pasivas (ventilación y protección solar móvil!); la manutención a largo plazo de instalaciones novedosas muchas veces ha sido el punto frágil de proyectos de desarrollo con nuevas tecnologías solares;
- hacer la construcción de viviendas sustentables en sus diferentes formas accesibles para toda la población, porque solamente entonces serán verdaderamente **socialmente sustentables**: diseños y soluciones técnicas económicos tanto para la vivienda popular como para la clase media son imprescindibles pero no suficientes para ese objetivo, hay que buscar e implementar formas nuevas de financiamiento y organización.

Un enfoque prometedor para enfrentar todos estos desafíos presentan las cooperativas de vivienda, que a su vez necesitan el respaldo y la cooperación con universidades y ONG (Organizaciones No Gubernamentales), eventualmente con alguna ayuda externa de organismos del estado y de la cooperación internacional. La realización de viviendas en forma de una empresa solidaria para su construcción y manutención puede ser un factor central para reducir los costos y permitir la participación democrática de los usuarios. La competencia técnica de las universidades es importante para el desarrollo y el respaldo científico de tecnologías nuevas. Las incubadoras como parte de la extensión universitaria, las cooperativas especiales y ONG disponen de experiencias valiosas y cumplen un papel importante en la difusión y organización como mediadores entre los sectores científicos y el resto de la sociedad.

El espectro amplio de puntos fuertes (y frágiles correspondientes), esbozado muy brevemente aquí, deja claro, que un proyecto universitario como la investigación resumida en los primeros capítulos del presente trabajo solamente puede ser un elemento en una estrategia de vivienda sustentable. La solución de todos los aspectos de una vivienda sustentable (véase Figura 9) y la verificación real - mas que técnica o experimental - de los potenciales y su realización práctica exigen no solamente la colaboración interdisciplinar / transdisciplinar de científicos, pero además la cooperación tanto con otros actores sociales, empresas solidarias como con los sectores mayoritarios de las sociedades latinoamericanas con necesidad de mejor vivienda y sus organizaciones, sean esas cooperativas, ONG, grupos locales u otras. La difusión en el futuro de las tecnologías y sus adaptaciones a los diferentes ambientes, tanto climáticos como económicos y sociales, hacen necesario la elaboración de proyectos en conjunto. Así, trabajando juntos y complementándose, los diferentes actores tienen el potencial de cumplir no solamente con los requisitos ecológicos y energéticos, pero con todos los requisitos económicos y sociales de viviendas realmente sustentables.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al proyecto "Viviendas sismorresistentes con materiales locales y climatización pasiva en zonas rurales de los Andes" del Laboratorio de Construcción Experimental con el financiamiento de la Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) y de la Cooperación Técnica Alemana (gtz). Los datos climáticos horarios originales fueron facilitados por el Centro Nacional de Medio Ambiente de mediciones de la Comisión Nacional de Medio Ambiente, ambos en Santiago de Chile. El programa DEROB-LTH fue utilizado gracias a la cooperación con la Universidad de Lund, Suecia.

REFERENCIAS

- MINVU Ministerio de Vivienda y Urbanismo 2000. Manual de Aplicación, Reglamentación Térmica, Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Santiago, Chile.
- Müller, E. 2001. Development of a Test Reference Year on a Limited Data Base for Simulations on Passive Heating and Cooling in Chile, Building Simulation - Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil.
- Müller, E. 2002. Manual de diseño para viviendas con climatización pasiva. Universidad de Kassel, Alemania. (disponible en formato electrónico por el autor)
- Müller, E. 2006. Crucial Building Parameters as a Novel Approach for the Design of Passive Solar Houses in a Mediterranean Climate, PLEA 2006 - The 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva - Switzerland.
- Müller, E. 2007. Estratégias para o Desenho de Casas Passivas e Sustentáveis numa Zona de Clima Mediterrâneo. IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Campo Grande / MS - Brasil.

- Müller, E. Román, R. 1996. Sistemas Solares Comunitarios para Calentamiento de Agua, Seminario Nacional y Congreso Internacional de Energías Renovables SENESE IX; Antofagasta - Chile.
- Müller-Plantenberg, C. et. al. 2005. Solidarische Ökonomie in Brasilien und Deutschland - Wege zur konkreten Utopie, Internationale Sommerschule in Imshausen, Entwicklungsperspektiven Nr. 83/84, Kassel.
- Norma Chilena NCh 1079.Of77, Zonificación climático - habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico, Santiago 1977.
- Rosa D'Avila, Márcio 2006. Possibilidades de Implementação de Construção Não-Convencional em Cooperativas Habitacionais no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Dissertação apresentada ao Curso de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo da Universidade de Kassel como requisito para a obtenção do Título de Doutor.

THERMAL ANALYSIS AND DESIGN RECOMMENDATIONS FOR THE DESIGN OF PASSIVE SOLAR HOUSES AND THE DISSEMINATION OF SUSTAINABLE BUILDING

***Abstract.** The design of passive solar houses presents a promising strategy for the improvement of thermal comfort conditions in dwellings of the central region of Chile. This way it constitutes an important option for sustainable dwellings in the region. A main objective of this publication was to prepare detailed proposals for the design of houses with solar heating and passive refrigeration, which permit to optimize the complex design equilibrium between the conflicting demands of a mediterranean climate with its hot and dry summers and cold but sunny winters. The thermal behavior of a series of house models were calculated dynamically on an hourly basis with a thermal simulation program. The necessary climate data were prepared with an own methodology, as a Test Reference Year was not available for Chile. This way, as well different types of light constructions, brick and earth constructions, with and without thermal insulation, as conventional houses and alternative constructions with different passive climatization strategies for the hot and cool period were evaluated. The design recommendations from former publications were verified with thermal simulations of complete houses, considering a wider gamut of strategies for solar heating. It was possible to present proved passive design proposals with simple solutions and local materials of lower energy content and cost. This shows, that with an optimized design it's possible to improve significantly the thermal comfort conditions in economically accessible dwellings of the region. Finally, the challenges and possibilities for the dissemination of sustainable and solar architecture are discussed. The methodology and approach developed here are extendable to other regions and climate zones of Latin America. This way the investigation contributes to the improvement of thermal comfort and the application of solar energy in the housing sector as essential elements of a sustainable development process.*

Key words: Solar Energy, Solar Houses, Passive Design, Thermal Simulation, Sustainable Architecture