

# Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú

Autor: Fredy Alonso Huaylla Roque

2010

DEDICO ESTE TRABAJO A MI  
FAMILIA Y EN ESPECIAL A  
MIS PADRES QUE PESE A  
TODO NO SE RINDEN  
CONMIGO

Este trabajo es el resultado de la colaboración de muchas personas, sin las cuales no hubiese aprendido ni crecido tanto en estos casi 2 años.

- Agradezco a todos mis compañeros de trabajo: Gonzalo, Rafael, Abel, Juan, Raquel, Luis, Sonia, Verónica, a todos.
- Agradezco sinceramente la amistad brindada por David Morillón y Helder Gonçalves, de los cuales no sólo aprendí experiencias sino también humildad.
- Agradezco a la familia y a los amigos, por su sinceridad y por su paciencia.
- Finalmente, mi agradecimiento más profundo a toda la comunidad de San Francisco de Raymina: a Nancy, Mariluz, Orlando, la pequeña Hayde, a todos. De ellos aprendí que la pobreza no implica infelicidad sino implica trabajar más, con la esperanza de que algún día las cosas realmente cambien.

## Índice General

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.2.1. Objetivos generales.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. PREGUNTAS FUNDAMENTALES.....	4
1.4. HIPÓTESIS.....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.6. ANTECEDENTES.....	5
1.6.1. Antecedentes en el Perú.....	5
1.6.1.1. Casa solar ubicada en Juli en la provincia de Chucuito - Puno.....	5
1.6.1.2. Casa solar ubicada en la provincia de Espinar–Cusco...7	
1.6.1.3. Trabajo del Grupo de apoyo al sector rural de la PUCP en el distrito de Langui, provincia de Canas – Cusco.....	8
1.6.1.4.- Casa solar en el distrito de Santo Tomás, provincia de Chumbivilcas – Cusco.....	9
1.6.2. Antecedentes en el extranjero.....	11
1.6.2.1. Trabajo realizado por Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités (GERES) en el Himalaya – India.....	11

1.6.2.2. Red Iberoamericana para el uso de energías renovables y diseño bioclimático en viviendas y edificios de interés social 2005-2008.....	13
1.6.2.2.1. Proyectos de bajo impacto y alta eficiencia energética.....	14
1.6.2.2.2. Edificios bioclimáticos de construção social e edificios sociais em Portugal.....	15
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR EN VIVIENDAS.....	18
2.1.1. Transferencia de calor por conducción.....	18
2.1.2. Transferencia de calor por convección.....	20
2.1.3. Transferencia de calor por radiación.....	24
2.1.4. Balance de energía para el aire dentro de una habitación....	24
2.2. ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA: NOCIONES Y CONCEPTOS.....	26
2.2.1. Estrategias de diseño.....	27
2.2.1.1. Ganancias.....	27
2.2.1.2. Pérdidas.....	27
2.2.1.3. Demanda de energía.....	27
2.2.1.4. Estado de la tecnología.....	28
2.2.2. Factores medioambientales y climáticos.....	28
2.2.3. Aspectos arquitectónicos de diseño.....	29
2.2.3.1. Ubicación y orientación.....	29
2.2.3.2. Distribución.....	30

2.2.3.3. Geometría.....	31
2.2.3.4. Materiales y almacenamiento de energía.....	33
2.2.3.5. Normativas.....	33
2.2.4. Elementos constructivos.....	34
2.2.4.1. Techos y suelos.....	34
2.2.4.2. Perforaciones y aberturas.....	34
2.2.4.3. Paredes y aislamientos.....	37
2.2.4.4. Elementos de protección y control solar.....	38
2.2.4.5. Influencia del entorno.....	39
2.2.4.5.1. Influencia de la vegetación.....	39
2.2.4.5.2- Influencia del agua.....	41
2.2.4.6. Técnicas de iluminación.....	42
2.2.4.7. Sistemas convencionales de refrigeración, calefacción y ventilación.....	43
2.2.5. Calefacción y refrigeración solar pasiva.....	44
2.2.5.1. Calefacción solar pasiva.....	44
2.2.5.2. Sistemas de refrigeración solar pasiva.....	49
2.3. TÉCNICAS COMPUTACIONALES.....	54
2.3.1. Programa de simulación EnergyPlus.....	54
2.3.1.1. Balance de energía de una zona térmica.....	55
2.3.1.2. Balance de energía en superficies exteriores.....	58
2.3.1.3. Balance de energía en superficies interiores.....	59
2.3.1.4. Conducción a través de paredes.....	60

2.3.1.4.1. Funciones de transferencia por conducción..	60
<b>3. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>62</b>
3.1. INICIO DE ACTIVIDADES Y SELECCIÓN DE COMUNIDAD.....	62
3.2. DIAGNÓSTICO TÉRMICO.....	62
3.3. VALIDACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN.....	63
3.4. MODELACIÓN Y SELECCIÓN DE MODIFICACIONES CONSTRUCTIVAS.....	63
3.5. MEDICIONES TÉRMICAS POSTERIORES A LA MODIFICACIÓN.....	63
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
4.1. INICIO DE ACTIVIDADES Y SELECCIÓN DE COMUNIDAD.....	64
4.1.1. Observaciones y discusiones.....	66
4.2. DIAGNÓSTICO TÉRMICO.....	67
4.2.1. Condiciones iniciales de la vivienda.....	67
4.2.2. Mediciones experimentales.....	70
4.2.2.1. Condiciones climáticas exteriores.....	71
4.2.2.1.1. Observaciones y discusiones.....	73
4.2.2.2. Condiciones térmicas interiores.....	74
4.2.2.2.1. Observaciones y discusiones.....	79
4.2.2.3. Flujos convectivos.....	80
4.2.2.3.1. Observaciones y discusiones.....	84
4.3. VALIDACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN.....	86
4.3.1. Observaciones y discusiones.....	88

4.4.	MODELACIÓN Y SELECCIÓN DE MODIFICACIONES CONSTRUCTIVAS.....	89
4.4.1.	Opciones de modificación constructiva.....	89
4.4.2.	Perfil de la modelación y diversos casos.....	93
4.4.2.1.	Observaciones y discusiones.....	95
4.4.3.	Modelo final.....	96
4.4.3.1.-	Observaciones y discusiones.....	100
4.5.	MEDICIONES TÉRMICAS POSTERIORES A LA MODIFICACIÓN.....	101
4.5.1.	Observaciones y discusiones.....	116
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>118</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>119</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>122</b>
A 1.	MARCO TEÓRICO.....	122
A1.1.	Confort térmico.....	122
A1.1.1.	Generación de calor del cuerpo humano y nivel metabólico (MET).....	123
A1.1.2.	Autorregulación del cuerpo humano.....	126
A1.1.3.	Condiciones para lograr confort térmico.....	127
A1.1.4.	Estimación del nivel de ropa (CLO).....	128
A1.1.5.	Balance térmico entre la persona y el medio.....	131
A1.1.6.	Temperatura radiante media.....	133
A1.1.7.	Índices de confort y cartas bioclimáticas.....	134
A1.1.7.1.	Auliciems.....	136

A1.1.7.2. Carta bioclimática de Olgyay.....	136
A1.1.7.3. Carta bioclimática de Givoni.....	138
A1.1.7.4. Método de Fanger, la escala PMV Y PPD.....	140
A 1.2. Técnicas computacionales.....	144
A 1.2.1. EnergyPlus.....	144
A 1.2.2. Interfase gráfica: Google SketchUp y Open Studio..	146
A 1.2.3. Panorama general de modelamiento en EnergyPlus.	147
A 1.2.4. Manejo integrado de la solución.....	148
A 1.2.5. Detalle de la modelación de transferencia de calor por conducción.....	149
A 1.2.5.1. Cálculo de las funciones de transferencia por conducción.....	149
A 1.2.5.2. Cálculos FTC en EnergyPlus.....	152
A 2. PLANOS DE LA VIVIENDA	
A 2.1. Planos de la vivienda en su estado inicial (Junio 2008).....	156
A 2.2. Planos de la vivienda después de la modificación (Septiembre 2009).....	157
A 3.- COSTOS DE LAS MODIFICACIONES CONSTRUCTIVAS.....	158



## Índice de Tablas

Tabla 1.1: Casos de neumonía y defunciones en menores de 5 años y adultos mayores de 60 años, desde la semana 01 hasta la semana 40 para los años 2006 a 2009. Fuente: MINSA 2009.....	2
Tabla 1.2: Caracterización térmica: paredes, coberturas y ventanas para los edificios analizados en Lisboa Portugal. Se observa la variación en el diseño conforme pasaron las décadas. (Gonçalves, 2005).....	17
Tabla 2.1: Las ocho regiones naturales o pisos ecológicos del Perú. (Brack, 2000).....	29
Tabla 2.2 Relación entre la anchura del parasol, L, y la altura de la abertura H....	39
Tabla 2.3 Velocidades orientativas del aire recomendadas según la temperatura. (Ibañez, 2005).....	49
Tabla 4.1: Condiciones climáticas exteriores promedio mensuales en el 2008, registradas en la comunidad de San Francisco de Raymina.....	73
Tabla 4.2: Condiciones termo-higrométricas interiores promedio mensuales en el 2008, registradas en la vivienda seleccionada de la comunidad de San Francisco de Raymina.....	78
Tabla 4.3: Energía total diaria promedio por convección natural que recibe el aire de la Sala, asociado a cada elemento constructivo que define el espacio. Valores para el mes de Julio.....	84
Tabla 4.4: Comparación entre el aislamiento térmico de cada elemento de la vivienda original con el aislamiento térmico propuesto en la configuración de modificación final.....	99
Tabla 4.5: Valores promedio mensuales. Comparación entre las temperaturas de aire registradas en los ambientes de la vivienda en el 2008 (antes de la modificación) y el 2009 (posterior a la modificación).....	114
Tabla 4.6: Valores promedio mensuales. Comparación entre las temperaturas de aire registradas en los ambientes de la vivienda en el 2008 (antes de la modificación) y el 2009 (posterior a la modificación).....	115

Tabla A1. Calor cedido al ambiente (W) según la actividad desarrollada por el individuo. (Barros, 2001).....	124
Tabla A2. Niveles metabólicos para distintas actividades. (Kvisgaard, 1997)...	125
Tabla A3. Aislamiento térmico de prendas de vestir. (Kvisgaard, 1997).....	129
Tabla A4. Aislamiento térmico de prendas de vestir. (Kvisgaard, 1997).....	130
Tabla A5. Gastos asociados a la modificación constructiva de la vivienda seleccionada.....	158

## RESUMEN

En las zonas altoandinas del Perú, cada año se estima que al menos 500 personas (entre niños y ancianos) fallecen a consecuencia de la neumonía en temporadas de frío intenso (mayo a octubre). Una de las razones de esto es que dentro de sus viviendas (típicamente de adobe) la temperatura del aire puede bajar hasta mínimos de 2°C. El objetivo del presente trabajo, que formó parte de un proyecto de investigación, fue obtener una propuesta técnica que logre que las temperaturas al interior de la vivienda sean más confortables. Se seleccionó una vivienda rural típica en la comunidad de San Francisco de Raymina, Ayacucho (3 700 m.s.n.m.). Se realizó un diagnóstico térmico de la vivienda; para ello, desde junio del 2 008 hasta abril del 2 009, se registraron las condiciones meteorológicas de la zona (temperatura, humedad relativa – H.R., velocidad y dirección del viento y radiación solar); así también se registraron las temperaturas y H.R. del aire en los ambientes interiores de la vivienda y se registraron temperaturas superficiales en: paredes, techos, ventanas y suelos. Posteriormente, utilizando el software de simulación térmica para edificios EnergyPlus 3,0, se propusieron modificaciones constructivas que permitan el aprovechamiento de la energía solar para elevar la temperatura de los ambientes. Desde mayo hasta agosto del 2009 se realizaron las modificaciones constructivas y se volvieron a registrar las condiciones térmicas en la vivienda. Como resultado final se observó un incremento de al menos 6°C respecto a los mínimos de temperatura de aire registrados en los mismos meses en el 2 008.

*Palabras clave: Confort térmico, arquitectura bioclimática, energía solar, infiltración de aire, software de simulación térmica.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En el Perú, un total de 6 millones 511 mil habitantes (según INDECI, 2 008), son sometidos a condiciones climáticas frías extremas en la zona sur, centro y oriente del país; específicamente en los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Cajamarca, Ancash y Apurímac, Cusco, Huancavelica, Huánuco, Junín, La Libertad, Moquegua, Pasco, Puno y Tacna (todos sobre los 3 000 m.s.n.m.). Así pues, desde enero a junio del año 2 009 fallecieron cerca de 300 personas, entre niños y ancianos, a consecuencia de infecciones respiratorias agudas (neumonía).

Las causas asociadas a estas terribles estadísticas son básicamente tres. La primera, una mala alimentación de las personas (principalmente niños), las cuales debido a su carencia económica y desconocimiento usualmente consumen alimentos poco nutritivos (fideos, etc.) por ser más baratos. La segunda, debido al tipo de ropa usada; siendo para las personas más barato y “más moderno” usar ropa sintética, la cual es inadecuada para las condiciones de frío extremo en que viven. La tercera es que, con el correr de los años las técnicas constructivas de las viviendas han devenido a menos, siendo estas menos aisladas térmicamente debido al uso de elementos como techos y puertas de calamina metálica; así como también una mala orientación y diseño de las viviendas.

Tabla 1.1. Casos de neumonía y defunciones en menores de 5 años y adultos mayores de 60 años, desde la semana 01 hasta la semana 40 para los años 2006 a 2009. Fuente: MINSA 2 009.

Departamentos	Neumonías				Defunciones			
	2006	2007	2008	2009	2006	2007	2008	2009
Amazonas	923	826	695	725	3	7	5	5
Ancash	1187	993	1100	967	22	24	17	12
Apurímac	1131	1020	907	780	4	5	7	9
Arequipa	2230	1967	2236	2012	9	14	13	15
Ayacucho	636	541	693	403	4	14	10	8
Cajamarca	2181	1987	2092	1994	40	28	23	18
Callao	931	841	1087	970	3	1	0	0
Cusco	2121	2127	1604	1576	27	29	27	35
Huancavelica	915	805	886	800	31	35	29	30
Huánuco	2281	1813	1923	1419	25	23	21	42
Ica	664	550	684	399	3	1	1	0
Junín	1369	1168	1352	994	28	30	28	31
La Libertad	1787	1278	1248	965	10	4	5	6
Lambayeque	936	651	650	700	0	2	0	11
Lima	8531	7916	7805	6555	58	47	27	21
Loreto	3819	3503	2354	3649	22	6	16	27
Madre de Dios	169	269	171	199	2	0	1	0
Moquegua	182	138	122	181	5	1	0	1
Pasco	768	766	752	611	7	16	10	14
Piura	2577	2110	2067	1933	15	19	12	10
Puno	1614	1596	1223	1462	65	51	71	82
San Martín	957	1071	921	841	2	8	0	5
Tacna	236	228	123	130	0	0	0	0
Tumbes	104	158	178	127	0	2	3	2
Ucayali	1831	1367	1568	1858	7	11	5	13
<b>Perú</b>	<b>40080</b>	<b>35689</b>	<b>34441</b>	<b>32250</b>	<b>392</b>	<b>378</b>	<b>331</b>	<b>397</b>

Fuente: RENACE/Dirección General de Epidemiología - MINSA, 10/10/2009

Departamentos	Neumonías			Defunciones		
	2007	2008	2009	2007	2008	2009
Amazonas	39	70	75	6	7	5
Ancash	133	175	225	5	7	3
Apurímac	231	160	186	8	9	7
Arequipa	400	805	981	33	51	60
Ayacucho	54	200	91	4	3	1
Cajamarca	54	90	91	2	0	0
Callao	2	256	440	0	3	4
Cusco	810	618	731	24	27	11
Huancavelica	125	188	173	55	31	31
Huánuco	133	186	128	5	11	8
Ica	67	176	134	1	8	2
Junín	223	201	155	19	9	18
La Libertad	561	469	408	4	9	12
Lambayeque	29	4	10	0	0	0
Lima	524	599	697	40	31	50
Loreto	136	274	343	1	2	12
Madre de Dios	22	31	17	0	0	0
Moquegua	53	56	56	3	5	8
Pasco	76	83	109	2	1	1
Piura	71	128	116	0	0	0
Puno	235	286	276	30	42	32
San Martín	15	27	38	0	0	1
Tacna	0	8	43	5	0	1
Tumbes	24	18	17	0	1	1
Ucayali	38	59	31	0	1	0
<b>Perú</b>	<b>4055</b>	<b>5167</b>	<b>5571</b>	<b>247</b>	<b>258</b>	<b>268</b>

Fuente: RENACE/Dirección General de Epidemiología - MINSA, 10/10/2009

Pese a ser un problema recurrente, el tema de confort térmico en el contexto bioclimático actual (rural principalmente) no ha sido una preocupación que haya marcado una ruta de acción en el Perú en los 10 ó 20 últimos años.

*“Tal vez sea porque tanto la ciudad capital Lima, como otras ciudades costeras que le siguen en importancia no sufren de climas muy extremos. No obstante, el Perú tiene otras ciudades que con el correr de los años han cobrado mayor importancia y en su población se han hecho más visibles los efectos de los cambios económicos, culturales y cambios en el clima mundial, esto último ha acentuado realidades climáticas de frío extremo que han llamado la atención y han merecido enfoques técnicos de importancia” (Barrionuevo y Espinoza, 2 005).*

*“Así también, en el Perú no se ha tocado con profundidad el tema de eficiencia energética en edificaciones, así como tampoco el tema de bioclimatización de viviendas en zonas rurales andinas. Así pues, bajo el marco de desarrollo de la “Red Iberoamericana para el uso de las Energías Renovables y diseño bioclimático en viviendas y edificios de interés social” del CYTED, coordinada por el Dr. Helder Goncalvez del INETI de Portugal, vigente entre 2 005 y 2 008, se comprobó que en el Perú no se ha tratado sistemáticamente la problemática del clima extremadamente adverso en altitudes mayores a 3000 m.s.n.m.” (Barrionuevo y Espinoza, 2 005).*

Así pues, se hace notoria la gran carencia de estudios adecuados y de información real de las condiciones climáticas en las que las poblaciones rurales andinas viven; esto implica, incluso, información acerca de las condiciones de confort térmico asociadas al poblador andino, el cual

está sujeto a condiciones de clima frío durante casi toda su vida. Algunas de las consecuencias que genera vivir en ambientes extremadamente fríos son: mortandad por enfermedades respiratorias, restricción de actividades nocturnas, depresión, etc.

El Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI) desarrolló desde marzo del 2 008 hasta noviembre del 2 009 el proyecto “Propuesta técnica de confort térmico para viviendas ubicadas en comunidades entre los 3 000 y 5 000 m.s.n.m.”, en dos comunidades rurales altoandinas, una en el departamento de Ayacucho (a 3 700 m.s.n.m.) y la otra en el departamento de Puno (a 4 500 m.s.n.m.). Este proyecto buscó llenar los vacíos existentes en el área de bioclimatización de viviendas rurales así como presentar soluciones y lineamientos técnicos para aplicarse a viviendas en el ámbito altoandino, con la finalidad de obtener temperaturas confortables en el interior de ellas. Este trabajo de tesis está basado en dicho proyecto de investigación.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De lo mencionado anteriormente, es claro que las consecuencias de las condiciones climáticas de frío intenso sobre el poblador altoandino son muy perjudiciales y en el peor de los casos pueden llegar a ser mortales. También es evidente que la razón de la vulnerabilidad a dichas condiciones climáticas abarca básicamente 3 puntos: la alimentación, la vestimenta y las deficientes condiciones de las viviendas.

El presente trabajo enfrenta uno de dichos puntos, el cual viene a ser las deficientes condiciones de las viviendas; sin embargo la definición del problema asociado a este punto requiere el planteamiento de las siguientes preguntas:

- ¿Por qué las viviendas típicas de las zonas altoandinas no logran tener ambientes interiores cálidos?
- Si las viviendas rurales altoandinas que se construyen actualmente generan ambientes interiores fríos. ¿Por qué se siguen construyendo viviendas de ese tipo?
- ¿Existe alguna normativa o información que oriente a la construcción de viviendas rurales más cálidas y cuyo costo (de la vivienda) sea viable?
- ¿Se podrán construir viviendas adecuadas para las condiciones de clima frío del ande?  
¿Se podrán rehabilitar viviendas rurales altoandinas típicas ya existentes y hacer que los ambientes interiores sean más cálidos?

Todas estas preguntas llevaron a la definición del problema de la siguiente forma:

**Actualmente, en el Perú y principalmente en las zonas altoandinas rurales, las técnicas constructivas y bioclimáticas utilizadas en la construcción de las viviendas son inadecuadas e ineficientes; generándose, a consecuencia, ambientes interiores fríos y no aptos para la actividad humana.**

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivos generales

- Establecer una propuesta técnica para la modificación constructiva de viviendas en comunidades altoandinas ubicadas sobre los 3 000 m.s.n.m, a fin de lograr condiciones de confort térmico en sus interiores.
- Poner de manifiesto la importancia de la arquitectura bioclimática en el campo de la construcción de edificaciones y principalmente en el campo de la construcción rural.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar las condiciones climatológicas de una comunidad rural altoandina seleccionada (sobre los 3 000 m.s.n.m.).
- Analizar las condiciones térmicas de una vivienda rural de la comunidad altoandina seleccionada.
- Realizar un diagnóstico térmico cualitativo y cuantitativo de la vivienda rural seleccionada.
- Elaborar un diseño de modificación constructiva de la vivienda seleccionada con el fin de hacerla térmicamente confortable, usando materiales de la zona y energías renovables, principalmente la energía solar.
- Implementar constructivamente el diseño de rehabilitación.
- Analizar y comparar los efectos térmicos de la rehabilitación constructiva de la vivienda respecto a las condiciones térmicas de la vivienda original.

## 1.3. PREGUNTAS FUNDAMENTALES

Las preguntas fundamentales que enmarcan el presente tema de investigación son:

**¿Por qué las viviendas ubicadas en zonas altoandinas son tan vulnerables a las condiciones de frío intenso?**

**¿Es posible incrementar las temperaturas de los ambientes interiores de una vivienda rural altoandina típica, a partir de rehabilitaciones constructivas que impliquen el uso de materiales de la zona y el uso de las energías renovables, principalmente la energía solar?**

## 1.4. HIPÓTESIS

Las hipótesis planteadas son las siguientes:

- En las viviendas rurales altoandinas típicas la falta de aislamiento térmico en partes como: pisos, techos, muros y ventanas; junto a problemas de infiltración de aire y

costumbres de ventilación no controlada, generan que los ambientes interiores en la vivienda sean fríos.

- La modificación constructiva de una vivienda a través de: aislamiento térmico de pisos, techos, muros y ventanas, del sellado de grietas por donde se filtra el aire, de costumbres de ventilación adecuados y de instalación de elementos tales como: invernaderos, muros Trombe, fogones mejorados y claraboyas traslúcidas; permiten incrementar la temperatura de los ambientes de la vivienda a niveles térmicamente confortables.

## 1.5. JUSTIFICACIÓN

Las condiciones climáticas tan frías de las zonas altoandinas generan que las viviendas tengan ambientes fríos; esto trae cada año consecuencias mortales a causa de infecciones respiratorias agudas principalmente en niños y ancianos. Adicionándose a esto el poco estudio de soluciones bioclimáticas para este problema (sobre todo en estas zonas altoandinas peruanas), hacen que el presente trabajo tenga las siguientes justificaciones:

- De relevancia social; ya que es un problema que afecta a miles de peruanos cada año.
- De relevancia académica; ya que no hay estudios preliminares en el Perú que hayan abordado este problema de la forma y con el marco metodológico con que se le abordó en esta investigación.
- De relevancia tecnológica; ya que permitirá aportes técnicos a la industria de la construcción.

## 1.6. ANTECEDENTES

### 1.6.1. Antecedentes en el Perú

#### 1.6.1.1. Casa solar ubicada en Juli en la provincia de Chucuito - Puno

Esta casa solar, ubicada en Juli, capital de la provincia de Chucuito perteneciente a la región Puno, fue concluida en mayo del 2 005. Esta vivienda fue iniciativa de la ONG suiza Missione Betlemme Immensee. El área de la vivienda es aproximadamente 88 m<sup>2</sup> (13.6m x 6.5m aproximadamente) y los espacios identificados son: un dormitorio, una sala-comedor, una salita de trabajo (estos ambientes están uno a continuación de otro a lo largo de un área rectangular), un baño, un invernadero (adosado a un ambiente) y un invernadero pequeño (el cual se atraviesa para ingresar a la vivienda por la puerta principal). Dentro de las características de esta vivienda se pueden identificar: paredes aisladas térmicamente (adobe – espacio de aire – adobe), techo de calamina metálica (fierro galvanizado) a una sola agua orientado hacia el norte, cielo raso o falso techo de triplay (que juega el rol de aislar térmicamente el techo), pisos aislados térmicamente (piedra – espacio de aire – y una configuración de estera, barro, tijerales y tablas machihembradas), claraboyas traslúcidas en el techo y el cielo raso (para permitir el ingreso de radiación solar directa); estas últimas se cierran de noche mediante un sistema de cubierta con

canales deslizantes. Los invernaderos adosados a ambientes de la vivienda funcionan como fuente de calor y prevención del ingreso de corrientes frías de aire, adicionándose ductos de intercambio de aire entre invernadero y ambientes de la vivienda. Además, se instaló una terma solar del tipo bolsa, para obtener agua caliente.



*Figura 1.1. Arriba: vista panorámica de la vivienda. Centro: a la izquierda se observa la caída del techo y el invernadero en la entrada, a la derecha las claraboyas. Abajo: a la izquierda el invernadero adosado a la vivienda, a la derecha detalle del aislamiento de las paredes.*

### 1.6.1.2. Casa solar ubicada en la provincia de Espinar–Cusco

Esta vivienda solar activa adecuada para el medio rural de la sierra peruana también fue construida por la misión Betlemme Immensee (ONG suiza) y Taller Inti en el 2 006, en la provincia de Espinar, región Cusco. Es una vivienda de un área de 8.40 m x 6.05m, la cual se distribuye en 4 espacios.

Algunas de las características de la vivienda es que posee pisos aislados térmicamente (usando una cama de piedras y tablas de madera machihembrada), el techo es de calamina metálica a una sola agua orientado hacia el norte, además tiene un falso techo para procurar el aislamiento térmico. Adicionalmente se habilitaron claraboyas traslúcidas en el techo para permitir el ingreso directo de la radiación solar. En la parte central de la vivienda se tiene un fogón mejorado que además de ser más eficiente, es una fuente directa para el calentamiento del aire. También posee una terma solar del tipo bolsa y un sistema fotovoltaico.

A diferencia de otros casos, en este estudio se muestran temperaturas medidas del aire al interior de la vivienda (mostrándose un incremento considerable, mínimos de 14°C), también muestran los efectos cuando el fogón aporta energía y cuando no lo hace. No obstante, no se especifica a qué ambiente corresponden las temperaturas mostradas quedando la duda de si dichas temperaturas son parecidas en los ambientes alejados al fogón.



*Figura 1.2. A la izquierda, fachada de la casa solar de Espinar; a la derecha, se muestra el detalle de las claraboyas instaladas en el falso techo y sus respectivas cubiertas.*



*Figura 1.3. A la izquierda: cocina mejorada; a la derecha: detalle del aislamiento del suelo y vista panorámica del interior de la vivienda.*

### 1.6.1.3. Trabajo del Grupo de apoyo al sector rural de la PUCP en el distrito de Langui, provincia de Canas – Cusco

En el año 2 008 el Grupo de apoyo al sector rural de la Universidad Católica del Perú realizó en la comunidad de Langui, ubicada en el distrito del mismo nombre, y en otras comunidades cercanas, una serie de modificaciones constructivas a las viviendas de las comunidades; esto con la finalidad de lograr ambientes más cálidos en el interior de las casas. Dichas modificaciones consistieron principalmente en tres acciones: aislamiento del techo (colocándose un cielo raso de tela), sellado de marcos de puertas y ventanas y renovación de estos, instalación de muros Trombe en las paredes orientadas al norte. Adicionalmente se instaló cocinas mejoradas para evitar problemas de salud generados por los humos emitidos por las cocinas típicas (de tres piedras).



*Figura 1.4. Arriba: muros Trombe instalados en las viviendas. Abajo: a la izquierda se observa el sellado del marco y la renovación de la puerta, a la derecha el cielo raso y el fogón mejorado, (Grupo PUCP, 2 009).*

#### 1.6.1.4. Casa solar en el distrito de Santo Tomás, provincia de Chumbivilcas – Cusco

Recientemente, en este año 2 009, se construyó una casa solar en el distrito de Santo Tomás ubicado en la provincia de Chumbivilcas, región Cusco. Dentro del marco del proyecto de Energía Solar – Programa de Empleo y Juventud de la prelatura de Sicuani. Los ambientes que conforman la vivienda son: dos habitaciones, una sala-comedor, una cocina y un baño. Alguna de las características de esta vivienda son: dobles muros aislantes térmicos (adobe – espacio de

aire de 5 cm – adobe), techo de calamina metálica a una sola agua, cielo raso de estera, barro y paja (que funciona como aislamiento térmico), también se habilitaron claraboyas traslúcidas en el techo y en el cielo raso para permitir el ingreso directo de la radiación solar; posee un invernadero adosado a un muro de la vivienda y un fogón mejorado ubicado en el centro de la casa, el cual se convierte en una fuente de calor directa. Adicionalmente se instaló una terma solar del tipo bolsa y un sistema fotovoltaico.



*Figura 1.5. Arriba: a la izquierda la casa solar, a la derecha detalle de la claraboya en el techo y en el cielo raso. Abajo: a la izquierda el invernadero adosado a la vivienda, a la derecha detalle del doble muro aislante térmico.*

## 1.6.2. Antecedentes en el extranjero

A nivel mundial la arquitectura bioclimática se ha desarrollado mucho, siendo mayor su avance en el continente Europeo. Estos avances siempre han estado orientados a lograr eficiencia energética y condiciones de confort en viviendas y edificios (usualmente en zonas urbanas); siendo esto más notorio en los últimos 10 años, en un contexto climático en el cual la reducción de emisión de gases de invernadero es cada vez más importante.

Por otro lado, en el presente trabajo se aborda el problema generado por condiciones climáticas muy frías dentro de viviendas rurales altoandinas ubicadas sobre los 3 000 m.s.n.m., siendo el problema básicamente de subsistencia; es por ello que localizar estudios internacionales en ambientes similares al altoandino es, probablemente, restringirse a zonas particulares en el mundo.

A continuación se mencionan algunos casos de interés desarrollados a nivel internacional que, en cierta forma, guardan alguna similitud con el caso altoandino abordado en este estudio.

### 1.6.2.1. Trabajo realizado por Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités (GERES) en el Himalaya – India

GERES es una ONG francesa creada en 1 976 dedicada a proyectos de desarrollo innovadores y sustentables; los países en los que actúa son: Francia y 8 países en África y Asia. Se menciona el caso de GERES debido a que uno de los lugares en los que actúa es el este de la India, en villas remotas de los estados de Jammu-Kashmin y Himachal Pradesh, en la cordillera del Himalaya.

Siendo el Himalaya la cordillera más alta del mundo (con nueve de las catorce cimas de más de 8 000 metros de altura), las condiciones climáticas frías y la altura son muy similares a las del ande peruano; es por ello que trabajos en arquitectura bioclimática en estas regiones son de particular interés para nuestro caso. A continuación se menciona un texto introductorio publicado en la página Web de GERES respecto al proyecto que ellos realizan en estas comunidades del Himalaya.

*“En los altos valles del Himalaya, las personas viven aisladas en condiciones de desierto a gran altitud. Ellos experimentan condiciones de vida extrema incluyendo temperaturas glaciales en invierno (usualmente debajo de -25 °C) y prolongados aislamientos (los caminos se hallan cerrados 6 meses al año). Existe poca vegetación y la biomasa es escasa.*

*La carencia de leña y los altos precios de los combustibles importados han sumergido a la región dentro de un estado de vulnerabilidad energética. Mujeres y niños dedican aproximadamente 2 meses cada verano recolectando residuos de biomasa y estiércol para cocinar y calentar. Las temperaturas dentro de los hogares, que están muy por debajo de los estándares en invierno, provocan condiciones insalubres de vida y limitan el desarrollo de*

actividades económicas. El ingreso diario del grupo seleccionado para el proyecto es de solamente 0,7 euros por persona.

Por otro lado, la región posee un excelente brillo de sol (sobre los 300 días anuales) que vale la pena desarrollar. Muchos proyectos pilotos han sido ejecutados por GERES desde el 2 000. Todos ellos han mostrado que se puede lograr un ahorro del 60% en el consumo de energía equipando viviendas con básicas y confiables tecnologías solares pasivas combinadas con aislamiento térmico. El calor atrapado es gradualmente liberado, mejorando el confort e incrementando el periodo de trabajo.

En cooperación con asociaciones locales, GERES extenderá su proyecto de construcción de viviendas solares pasivas por otros 4 años.” (GERES, 2 009).

En la página web de GERES se mencionan algunas de las consideraciones bioclimáticas tomadas en cuenta en su proyecto, entre ellas se tiene:

- Orientación de las viviendas, considerando diseños asimétricos en los cuales las paredes sur sean las más largas y procurando ventanas grandes en estas paredes; por el contrario, la menor cantidad de aberturas en las paredes orientadas al norte.
- Aislamiento térmico de la vivienda, usando materiales locales como: paja, maleza, estiércol, turba, aserrín o virutas de madera, siendo el techo de madera local.
- Fuentes de calor a través de muros Trombe o invernaderos adosados a ambientes, estos elementos usualmente colocados en las paredes orientadas al sur.



Figura 1.6. A la izquierda: vista panorámica de las cordilleras del Himalaya, se observa la distribución de las viviendas en estas zonas. A la derecha: un niño realizando recolección de leña, la cual se usa para cocinar y calentar las viviendas, (GERES, 2 009).



*Figura 1.7. Arriba: a la izquierda se observa una vivienda propuesta por GERES, la pared sur posee grandes ventanas y muros Trombe; a la derecha se observa un invernadero adosado a los ambientes de la vivienda. Abajo: un invernadero el cual provee de alimentos durante el invierno, (GERES, 2009).*

Este proyecto de GERES inició en 2 008 y tiene una duración de 4 años. Uno de sus objetivos es la construcción de 1 000 edificios domésticos y comunales. Esta ONG también ha tenido actividad en el Tibet, China; modificando escuelas y considerando técnicas bioclimáticas.

Cabe mencionar que GERES organizó el seminario “Energy and Climate Change in Cold Regions” en abril del 2 009, el cual estuvo orientado a las regiones de Asia occidental.

#### 1.6.2.2. Red Iberoamericana para el uso de energías renovables y diseño bioclimático en viviendas y edificios de interés social 2 005-2 008

Esta red temática fue patrocinada por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) desde el 2 005 (inicio) hasta el 2 008 (finalización); esta red fue coordinada por el Dr. Helder Gonçalves, miembro del Instituto Nacional De Engenharia, Tecnología E Inovação (INETI) de Portugal, y tuvo como objetivo general promover el uso de las energías renovables y de las técnicas de diseño bioclimático en viviendas y edificios de interés social con el fin de asegurar mejores condiciones de vida de sus usuarios. Dentro de los

países que participaron en esta red se tiene: Argentina, Brasil, Chile, Ecuador, El Salvador, España, México, Paraguay, Perú y Portugal.

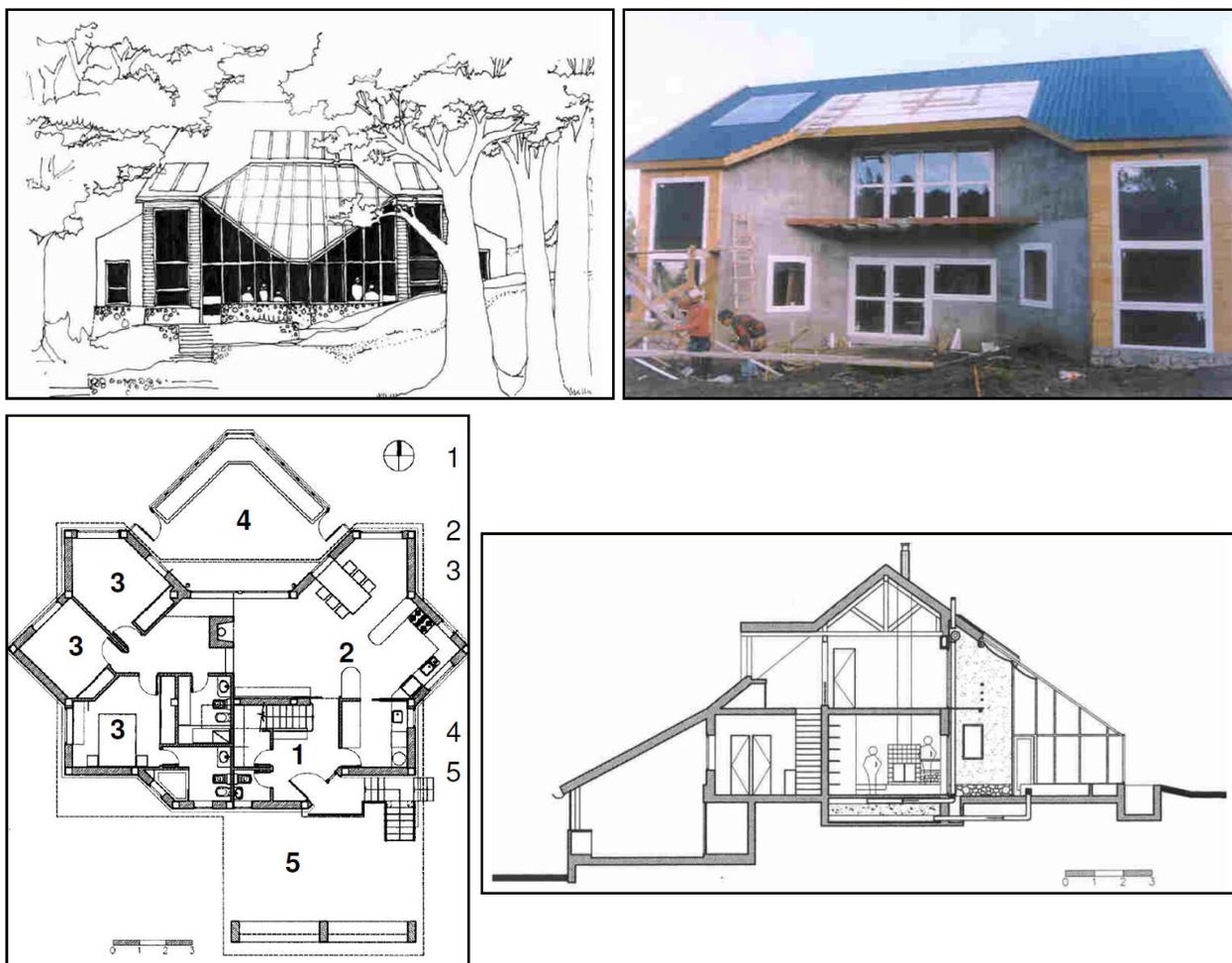
A continuación se mencionan dos casos uno de Argentina y uno de Portugal que fueron motivo de estudio de esta red en el seminario “Los Edificios Bioclimáticos en los Países de Ibero América”, realizado en Argentina en el 2 005.

#### 1.6.2.2.1. Proyectos de bajo impacto y alta eficiencia energética

En este estudio se menciona un caso de diseño y construcción de una vivienda solar familiar para una pareja de esposos con cuatro hijos. Esta vivienda, de la familia Fuentes-López, se ubica a 18 km al norte de la ciudad de Bariloche en la provincia de Río Negro, Argentina; la zona está a una latitud de 41°S, a 950 m.s.n.m. y se encuentra en la zona bioambiental VI, caracterizada como muy fría según normativa argentina. Algunas de las características climáticas de Bariloche son las siguientes: temperatura mínima de diseño de -5,8°C en invierno, con una mínima absoluta de -21°C. Nieve frecuente en el terreno y las horas anuales de sol corresponden a 40% del total, los días son nublados y lluviosos distribuidos durante todo el año. La radiación solar en verano es intensa, combinada con temperaturas estivales máximas de 24°C.

*“El comitente estableció como objetivo un proyecto energéticamente eficiente con energía solar para calefacción, agua caliente y electricidad, y de bajo impacto ambiental. Para resolver estos requisitos se incorporó gran inercia térmica en paredes que permitiese almacenar el calor de los sistemas solares pasivos y activos en invierno y atenuar las temperaturas interiores en verano. Se logró además excelente nivel de aislación térmica en techos, paredes y ventanas, superando el nivel A de la Norma IRAM 11.605. Se incorporaron tres sistemas solares pasivos diferentes: ganancia directa, muro acumulador e invernadero, así como un sistema activo para almacenar el calor del invernadero en un lecho de piedras y dos sistemas activos utilizando paneles fotovoltaicos para la generación auxiliar de electricidad y colectores solares planos para calentamiento de agua.” (De Schiller, et al., 2 005).*

La vivienda es de dos plantas; la planta baja consta de un espacio central para estar-comedor-sala, estudio, oficina y 3 dormitorios, la planta alta consta de dormitorios y estudios. Los materiales de construcción seleccionados fueron de bajo impacto, siendo los materiales locales preferentes la madera y la piedra. En la fachada norte se incorporaron tres tipos de sistemas solares pasivos: un invernadero de gran volumen y superficie nominal de 48m<sup>2</sup> adosado a los ambientes orientados al norte, incorporándose además un sistema de convección forzada al lecho de piedras debajo de las áreas del estar; claraboyas transparentes en el techo, para tener una ganancia directa de radiación en invierno, siendo beneficiados ambientes de la planta baja y alta e instalándose una superficie nominal de 7,5 m<sup>2</sup>; muros acumuladores compuestos de dos paneles de mampostería densa con vidrio fijo exterior sobre la fachada N, con un alero que proporciona sombra en verano y una superficie nominal expuesta de 16m<sup>2</sup>.



*Figura 1.8. Arriba izquierda: bosquejo de la vivienda solar, se observa los ambientes orientados al norte, invernadero y muros acumuladores. Arriba derecha: fachada norte de la casa en obra, antes de construir el invernadero. Abajo izquierda, ambientes de la planta baja, 1 hall, 2 cocina, 3 dormitorios, 4 invernadero, 5 garage. Abajo derecha: en sentido de izquierda a derecha, sur a norte, (De Schiller, 2005).*

#### 1.6.2.2.2. Edificios bioclimáticos de construção social e edificios sociais em Portugal

Si bien en Portugal (y en general en Europa) las condiciones de vida son mucho mejores que en Sudamérica y las condiciones climáticas no son tan parecidas a las de las zonas altoandinas; considero importante mencionar el caso de las edificaciones sociales en Lisboa debido a que, en el largo plazo, los problemas que afrontan estas edificaciones europeas las afrontarán (y en muchos casos ya afrontan) las edificaciones peruanas. A continuación se muestra un texto del estudio.

*“La ciudad de Lisboa es un ejemplo vivo de las asimetrías existentes en Portugal, entre el litoral y el interior y el medio urbano y el medio rural. La inexistencia de condiciones de trabajo en el interior del país, desde la década de los sesenta ha dado origen a un flujo de migraciones internas en dirección a las ciudades de litoral, en busca de mejores condiciones de vida.*

*Los barrios sociales procuran por un lado garantizar condiciones de habitabilidad y por otro lado promover la integración de estas poblaciones. No obstante, la fisonomía de los barrios sociales comienza desde luego por obedecer a algunas particularidades, que se manifiestan a nivel de la localización, de las condiciones de salubridad, de la infraestructura involucrada y de la calidad de la arquitectura y materiales de construcción, aspectos que determinan a la partida un estigma discriminatorio a estos barrios y a las personas que en ellas habitan.”(Gonçalves, 2005).*

Portugal es uno de los países europeos más cálidos. La primavera y el verano son soleados y las temperaturas más altas durante julio y agosto son de entre 28°C a 35°C, a veces llegando a los 40°C en el interior del sur. El otoño e invierno son típicamente lluviosos y ventosos, aunque días soleados no son extraños. No son comunes las temperaturas menores a los 2°C en la zona costera, generalmente estando en un promedio de 8°C a 11°C.

Como se menciona en el texto, la fuerte migración a las ciudades costeras implicó la construcción de edificios sociales (en los cuales cada departamento usualmente fue de 3 ó 4 habitaciones), observándose que en cada década se presentaba un cambio en el diseño de los nuevos edificios sociales; sin embargo, no se daba mucha importancia al aislamiento térmico o a las consideraciones bioclimáticas.

Debido a las condiciones climáticas calurosas y frías y a las características térmicas de los materiales, el gasto energético en la aclimatación de este tipo de edificios ha sido y es considerable. Recién desde la década de los 90s empieza a verse algunas consideraciones bioclimáticas en la concepción de los edificios sociales, todo esto logrado a través de la entrada en vigor del “Reglamento de las Características de Comportamiento Térmico de los Edificios”.

En la actualidad existe un reglamento que exige que las nuevas edificaciones sean bioclimáticas, esto con la finalidad de lograr edificios eficientes y, a largo plazo, lograr edificios de consumo cero; es decir, que los mismos edificios generen la misma energía que consumen. Para todo esto se ha implementado un sistema de certificación de edificios, siendo estos calificados desde niveles que van desde el A hasta el G.

Tabla 1.2. Caracterización térmica: paredes, coberturas y ventanas para los edificios analizados en Lisboa Portugal. Se observa la variación en el diseño conforme pasaron las décadas. Donde  $U$  es transmisividad térmica equivalente, (Gonçalves, 2 005).

Década	Paredes	$U$ (W/m <sup>2</sup> . °C)	Cobertura	$U$ (W/m <sup>2</sup> . °C)	Vanos envidriados	$U$ (W/m <sup>2</sup> . °C)
60	Ladrillo 22cm	1,6	Inclinada	2,9	Vidrio simple de 4mm	5,8
					Marco de vidrio con persianas exteriores de madera	3,7
70	Ladrillo 22cm	1,6	Horizontal	3,9	Vidrio simple de 4mm	5,8
					Marco de vidrio con cortinas interiores de madera	4,2
80	Doble ladrillo 11 y 7 cm	1,5	Inclinada	3,3	Vidrio simple de 3mm	5,8
					Marco de vidrio con persianas exteriores de madera	3,7
					Marco de vidrio con cortinas interiores de madera	4,2
90	Doble ladrillo 11 y 7 cm	1,5	Inclinada 5 cm aislamiento térmico	0,7	Vidrio simple de 4mm	5,8
					Marco de vidrio con persianas exteriores de madera	4,2
					Marco de vidrio con cortinas interiores de madera	4,8
2000	Doble ladrillo 11 y 15 cm	1,2	Inclinada 6 cm aislamiento térmico	0,6	Vidrio simple de 6mm	5,7
					Marco de vidrio con persianas exteriores de madera	4,2



*Figura 1.9. Edificio solar demostrativo construido por el INETI. A la izquierda, se observa la pared sur en la cual hay grandes ventanas y paneles fotovoltaicos. A la derecha, la pared norte en la cual las ventanas son mucho más pequeñas, (Gonçalves, 2 005).*

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR EN VIVIENDAS**

A continuación se da una descripción muy breve de las formas de transferencia de calor que se dan en la naturaleza y en particular al interior de cualquier edificio.

#### **2.1.1. Transferencia de calor por conducción**

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas. En gases y líquidos debido a choques intermoleculares; y en sólidos debido a vibraciones moleculares o movimiento de electrones.

El calor transferido por conducción en un sólido se puede de cuantificar a partir del uso de la “Ley de Fourier”. Por ej.: el calor por conducción a través de una varilla cilíndrica muy larga se puede aproximar según lo mostrado en la figura 2.1.

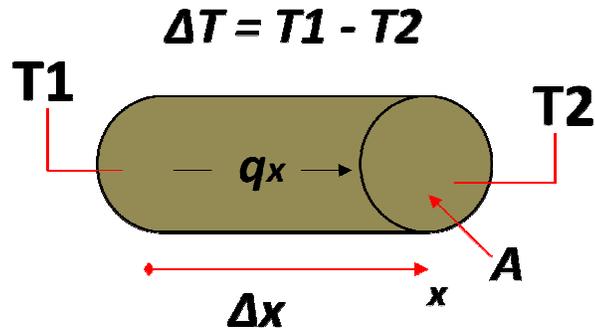


Figura 2.1. Esquema del flujo de calor por conducción a través de una varilla cilíndrica muy larga.

Según la ley de Fourier, el flujo de calor por conducción a través de esta varilla cilíndrica se puede cuantificar a través de la siguiente ecuación.

$$q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

donde

Planteando la ecuación 2.1 en forma diferencial se tiene:

$$q''_x \equiv \frac{q_x}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} \quad (2.2)$$

Al realizarse el balance de energía para un volumen diferencial de un sólido, la ecuación (2.2) es utilizada para deducir la denominada “ecuación de calor en un sólido”, según se muestra en la figura 2.2.

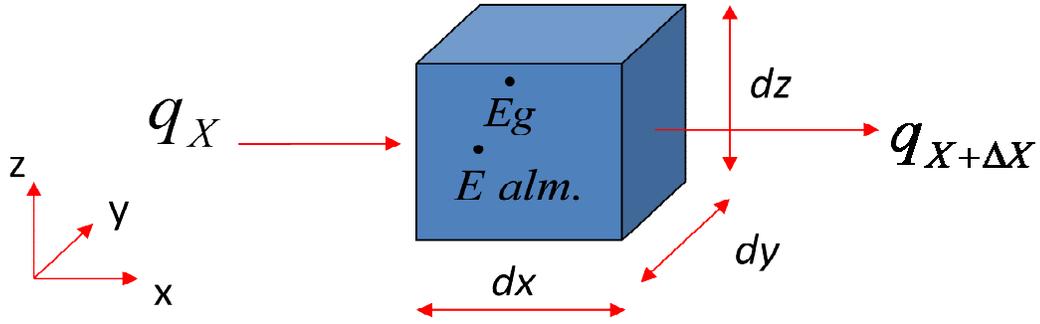


Figura 2.2. Esquema del flujo de calor por conducción a través de un volumen de control.

En este caso se asume que la energía generada es nula. La ecuación obtenida del balance de energía es:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho \times c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

### 2.1.2. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección se da entre un fluido en movimiento y una superficie, y se compone de dos mecanismos. Uno asociado al movimiento molecular aleatorio y el otro asociado al movimiento global o macroscópico del fluido. Este último indica que en cualquier instante grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva y, en presencia de un gradiente de temperatura entre fluido y superficie, contribuyen a la transferencia de calor.

Al darse el movimiento de un fluido sobre una superficie, se desarrolla una región en el fluido en la que la velocidad varía desde cero (en la superficie) a un valor finito “u” (asociado al fluido). Esta región se denomina “capa límite hidrodinámica”.

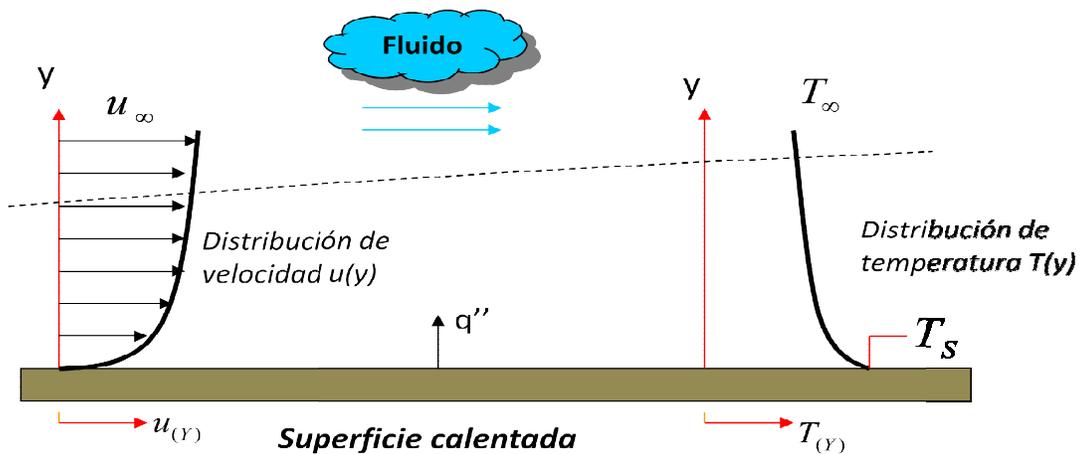


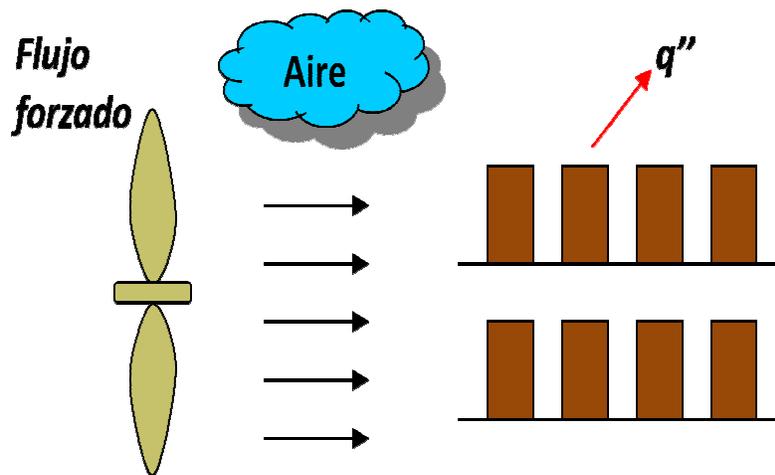
Figura 2.3. Esquema del flujo de calor por convección entre una superficie y un fluido en movimiento, la línea punteada delimita la capa límite hidrodinámica.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, el modelo apropiado está dado por la “ley de enfriamiento de Newton”.

$$q = h \times A \times (T_S - T_\infty) \quad (2.3)$$

donde

Según sea el origen del movimiento, la transferencia de calor por convección entre una superficie y un fluido puede darse de dos formas: convección forzada y convección natural. Las figuras 2.4 y 2.5 ilustran esto.



*Figura 2.4. Transferencia de calor por convección forzada. En este caso el origen del movimiento del fluido es por un mecanismo exterior (en este ej. es un ventilador).*

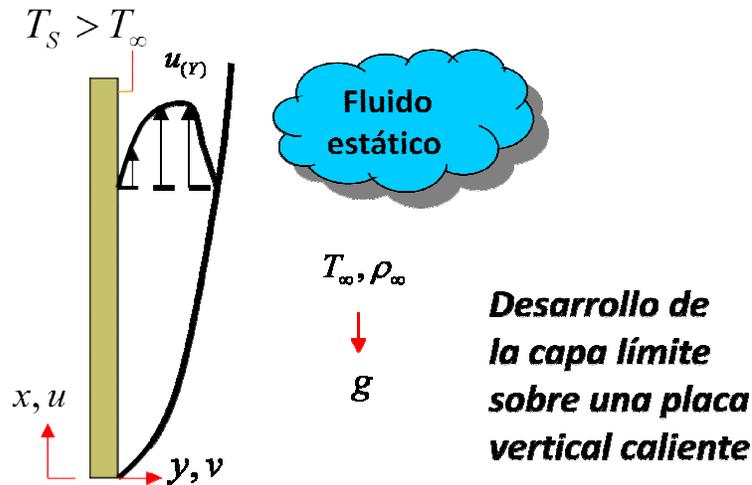


Figura 2.5. Transferencia de calor por convección natural. En este caso el origen del movimiento es por una diferencia de densidades en el mismo fluido.

En la siguiente figura se muestran algunas formas del movimiento del aire al darse una transferencia de calor por convección natural, generada por una diferencia de densidades en el mismo fluido.

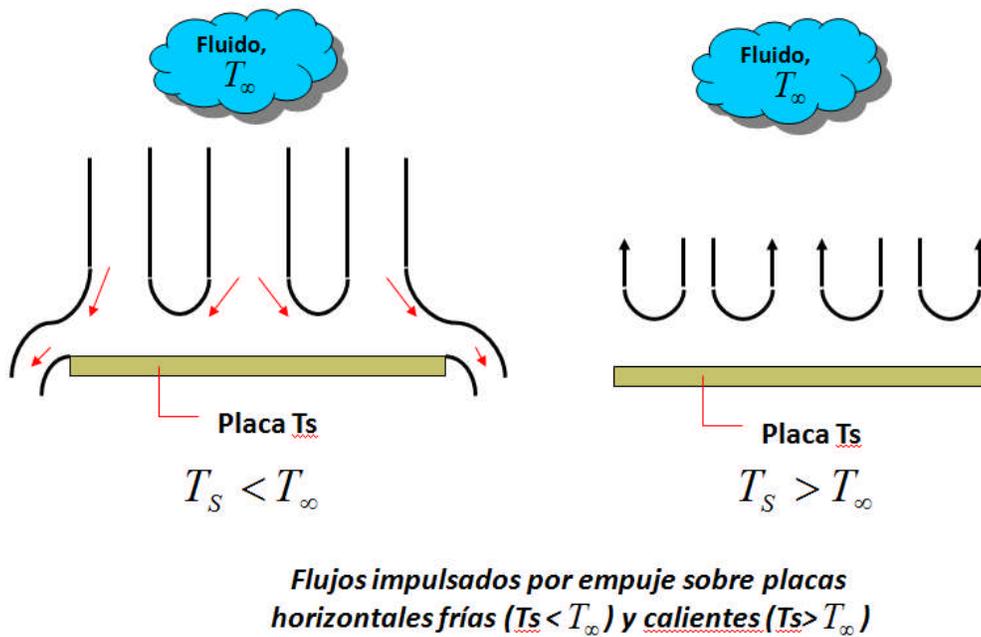


Figura 2.6. Transferencia de calor por convección natural. Movimientos de un fluido sobre una placa plana.

Una de las relaciones empíricas usadas para determinar el coeficiente pelicular para convección natural en superficies planas verticales, dado por Churchill y Chu es: (Churchill, 1975)

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.4)$$

Siendo todas las propiedades evaluadas a la temperatura de película dada por:

$$T_f = \frac{T_s + T_{FLUIDO}}{2} \quad (2.5)$$

y además:

$$\overline{Nu}_L = \frac{h \times L}{k} \quad (2.6)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta\rho(T_s - T_{FLUIDO})L^3}{\mu\alpha} \quad (2.7)$$

donde

$\overline{Nu}_L$  = es el número de Nusselt

$Ra_L$  = es el número de Rayleigh

$g$  = constante gravitacional  $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$

$h$  = es el coeficiente pelicular  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$

$T_s$  = es la temperatura de la superficie

$T_{FLUIDO}$  = es la temperatura del fluido  $[K]$

$\beta$  = coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido  $[K^{-1}]$

$\rho$  = densidad del fluido  $\left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$

$L$  = longitud característica de la superficie  $[m]$

$\mu$  = viscosidad del fluido  $\left[ \frac{N \times s}{m^2} \right]$

$\alpha$  = difusividad térmica del fluido  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

### 2.1.3. Transferencia de calor por radiación

La radiación térmica es la energía emitida en forma de ondas electromagnéticas por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Este modo de transferencia de energía no requiere la presencia de un medio material. El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por:

$$E = \varepsilon \times \sigma \times T_s^4 \quad (2.8)$$

Donde “ $\varepsilon$ ” ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ) es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad, depende marcadamente del material de la superficie y del acabado

### 2.1.4. Balance de energía para el aire dentro de una habitación

Puesto que las superficies interiores de una habitación se caracterizan por ser: paredes planas verticales, superficies planas horizontales, superficies planas con cierta inclinación; y puesto que la transferencia de calor entre dichas superficies interiores y el aire ambiente interior es por convección natural (se considera que el intercambio de energía por radiación es sólo entre superficies y dicho efecto se ve en las mismas temperaturas superficiales de paredes, techos, etc.); se pueden utilizar relaciones empíricas (asociadas a las geometrías de las superficies) para determinar coeficientes de convección peliculares, (Churchill, 1975).

Este planteamiento deja ver que el aire dentro de una habitación se calienta o enfría exclusivamente por flujos de calor convectivos entre superficies y aire. Se considera un flujo de calor por convección natural ya que dentro de las habitaciones usualmente la velocidad del viento es pequeña y el movimiento del aire se da por diferencia de densidades.

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas, la ecuación de balance de energía para un volumen de control del aire dentro de una habitación en cada instante será,

$$\dot{q}_{\text{DE TODAS LAS SUPERFICIES}} + \dot{m}_{\text{INFLTRACIÓN}} \times C_{e_{\text{AIRE}}} \times (T_{\text{AMB EXT}} - T_{\text{AIRE}}) = \rho_{\text{AIRE}} \times C_{e_{\text{AIRE}}} \times \text{Volumen aire} \times \frac{\partial T_{\text{AIRE}}}{\partial t} \quad (2.8)$$

donde

$\dot{q}_{\text{DE TODAS LAS SUPERFICIES}} = \text{suma de flujos de calor convectivos naturales desde cada superficie hacia el aire de la habitación} \quad [W]$

$T_{\text{AMB EXT}} = \text{Temperatura del aire exterior que ingresa a la zona térmica} \quad [K]$

$C_{e_{\text{AIRE}}} = \text{Calor específico del aire de la habitación} \quad \left[ \frac{J}{Kg \times K} \right]$

$\dot{m}_{INFLITRACION} = \text{masa por unidad de tiempo con que el aire de la habitación es renovado} \quad \left[ \frac{Kg}{s} \right]$

$Volumen\ aire = \text{volumen del aire de la habitación} \quad [m^3]$

y a lo largo de todo el día será:

$$Q_{TOTAL\ DE\ TODAS\ LAS\ SUPERFICIES} + \int_{DÍA} \dot{m}_{INFLITRACION} \times Ce_{AIRE} \times (T_{AMB\ EXT} - T_{AIRE}) \times dt = \int_{DÍA} \rho_{AIRE} \times Ce_{AIRE} \times Volumen\ aire \times \left[ \frac{\partial T_{AIRE}}{\partial t} \right] \times dt \quad [J] \quad (2.9)$$

En esta ecuación se considera que  $T_{AIRE}$  es una función armónica (seno o coseno con periodo T = 24 horas), por lo tanto  $\left[ \frac{\partial T_{AIRE}}{\partial t} \right]$  también lo es, y la integral de esta derivada a lo largo del día es nula. Por lo tanto la ecuación (2.9) se reduce a,

$$Q_{TOTAL\ DE\ TODAS\ LAS\ SUPERFICIES} + Q_{TOTAL\ DEBIDO\ A\ INFILTRACIONES} \approx 0 \quad [J] \quad (2.10)$$

Esta ecuación pone en evidencia que si se eliminaran completamente las infiltraciones en la habitación, la energía neta transmitida desde las superficies interiores al aire debería ser nula.

De las ecuaciones (2.9) y (2.10) se deduce que las infiltraciones influyen directamente sobre la temperatura del aire de la habitación a lo largo del día.

## 2. 2. ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA: NOCIONES Y CONCEPTOS

Existen muchas definiciones para el concepto de “Arquitectura Bioclimática”, pasamos a mencionar algunas.

*“La arquitectura bioclimática es un tipo de arquitectura que persigue controlar y optimizar el comportamiento energético de las edificaciones, y reducir, con ello, su impacto ambiental, a partir de unos criterios de diseño basados en la obtención del máximo partido de los elementos constructivos y funcionales propios del edificio, teniendo en consideración y aprovechando al máximo las características climáticas del emplazamiento donde se ubica.” (Ibañez, 2 005).*

*“La arquitectura bioclimática puede definirse como la arquitectura diseñada sabiamente para lograr un máximo confort dentro del edificio con el mínimo gasto energético. Para ello aprovecha las condiciones climáticas de su entorno, transformando los elementos climáticos externos en confort interno gracias a un diseño inteligente. Si en algunas épocas del año fuese necesario un aporte energético extra, se recurriría si fuese posible a las fuentes de energía renovables.” (García, 2 009).*

Si bien existen muchas definiciones y muchos términos equivalentes al de “Arquitectura Bioclimática” (arquitectura solar pasiva, arquitectura ecológica, arquitectura sostenible, etc.), la idea central es la misma: CERO de fuentes de energías contaminantes.

Una de las razones por la cual los conceptos y enfoques asociados a la arquitectura bioclimática son cada vez más tomados en cuenta es la utilización cada vez más intensa de energía en los edificios, lo que conduce a un deterioro del medio ambiente y a una dependencia cada vez mayor hacia los países suministradores de las fuentes de energía de combustibles fósiles. Esto sucede debido a que buena parte de las edificaciones actuales confieren a sus ocupantes unos, cada vez más exigentes, niveles de confort a costa del consumo de grandes cantidades de energía, pues las condiciones de confort se obtienen casi exclusivamente a partir de instalaciones (mecánicas, eléctricas, térmicas..) cada vez más complejas, que consumen cantidades elevadas de energía y hacen que la habitabilidad de los edificios dependan de la disponibilidad y continuidad del suministro de fuentes de energía (comodidad = mayor gasto de energía).

Por otro lado, la arquitectura bioclimática tiene una estrecha relación con la eficiencia energética, siendo los cuatro parámetros que definen el comportamiento térmico del edificio: el control de ganancias, el control de pérdidas, el control de la demanda y el estado de la tecnología; factores tomados en cuenta en las estrategias de diseño.

A continuación se hace una descripción breve de los criterios tomados en cuenta cuando uno realiza un diseño de un edificio bioclimático. Se asumirá, en este caso, una localización en el hemisferio sur (para el caso del hemisferio norte las consideraciones cambiarán: norte por sur).

### 2.2.1. Estrategias de diseño

Al momento de realizar el diseño de una edificación, se tiene que tomar en cuenta los siguientes puntos asociados a la performance energética del edificio.

#### 2.2.1.1. Ganancias

Dentro de las formas en las que una edificación puede ganar energía se tienen:

- Accidentales; asociadas a lámparas, fuentes de energía y personas, esto genera un gasto no deseado y si se quisiera evitar una de las opciones es adquirir equipos más eficientes.
- Energía solar pasiva; puede ser directa (a través de acristalamientos), indirecta (masas térmicas) y aisladas (sistemas adosados a las viviendas o ubicados a cierta distancia). En este caso se da relevancia a las formas y a las propiedades de los materiales.
- Energía solar activa, análogo al anterior pero con uso de energía convencional.

#### 2.2.1.2. Pérdidas

Dentro de las formas en las que una edificación puede perder energía se tienen:

- Por transferencia de calor y bajo aislamiento térmico; asociado a pérdidas por la envolvente, se puede evitar hasta cierto punto haciendo provisiones en la selección del lugar de la edificación; y trabajando con indicadores tales como: Perímetro/Área; Área/Volumen, haciéndolos mínimos.
- Infiltraciones y ventilación.
- Eficiencia de equipos y sistemas; el uso de equipos ineficientes implica una pérdida “virtual” de energía (desde el punto de vista económico).

#### 2.2.1.3. Demanda de energía

Básicamente se deben considerar tres aspectos:

- Satisfacción de necesidades; logrado a través del uso de fuentes convencionales o del uso de recursos naturales (ej. luz natural o artificiales).
- Satisfacción eficiente de necesidades; orientado a que, cualquiera sea la opción que elijamos (natural o artificial), se logre la mayor eficiencia en el rendimiento.
- Flexibilidad del uso; con la finalidad de lograr confort en espacios más reducidos de acuerdo a las necesidades de los usuarios y lograr mayor eficiencia energética (ya que permite el uso de energía sólo en espacios que están siendo ocupados).

#### 2.2.1.4. Estado de la tecnología

Es importante conocer todas las opciones tecnológicas disponibles para una buena elección en la solución del problema, orientado tanto al “estado de la tecnología” como a la “tecnología adecuada a un uso y fuente de energía determinados”; notar también que no siempre lo más reciente es lo más adecuado.

#### 2.2.2. Factores medioambientales y climáticos

Las condiciones climáticas influyen críticamente en el comportamiento térmico de los edificios, es por ello que un conocimiento preciso del comportamiento de estos parámetros es requerido cuando se realice un diseño. El clima se puede diferenciar a distintos niveles. Así, se tienen climas latitudinales (asociados a la latitud del lugar en el planeta: tropicales, fríos, etc.), climas regionales, climas locales y microclimas; estos últimos afectados por factores del lugar, los cuales se mencionan a continuación.

- Altitud; por ej. es conocido que a mayor altura disminuye la temperatura del aire y el enfriamiento del suelo suele ser más rápido y mayor por las noches; sin embargo la radiación solar aumenta.
- Vientos; según la rapidez promedio con que corran los vientos y la existencia de direcciones preferenciales se pueden ver favorecidas las pérdidas de calor por convección.
- Orografía; muy importante asociado al tema de vientos, los cuales pueden tener una influencia importante por la orografía local haciendo que se generen direcciones preferencial o que el terreno sea aislado y genere aire estanco.
- Masas térmicas grandes; tales como mares, lagos y ríos, los cuales debido a su gran inercia térmica están más fríos que el terreno en el día y más templados durante la noche, pudiendo generar vientos refrescantes. Otro efecto es la humedad, siendo apreciable su efecto en un radio de 10 km aproximadamente, (Ibañez, 2 005).
- Vegetación; propiciando protección de vientos, apantallamiento de ruido, favorecimiento estacional de radiación incidente, etc.
- Disposición de edificaciones en zonas urbanas; cuanto más densa sea una zona urbana menos energía solar estará disponible por edificación, esto básicamente por generación de sombras; además, la dirección preferente de vientos es variable de lugar en lugar, siendo el análisis más complicado. Por lo tanto, un buen diseño, orientación y distribución de edificios generaría una satisfacción de necesidades de calentamiento y generación de sombras.

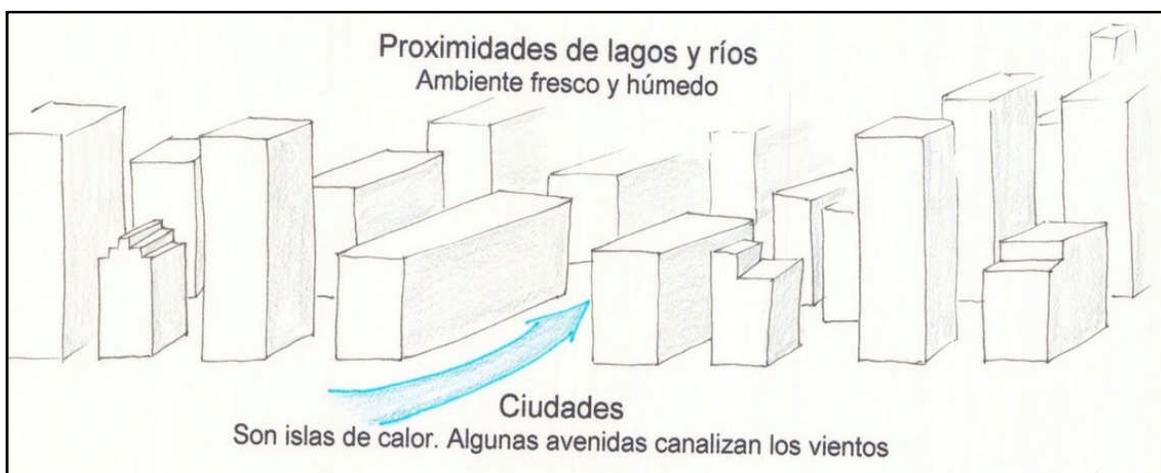


Figura 2.7. Direcciones de viento preferenciales asociado a disposición de edificaciones en zonas urbanas, (García, 2009).

Tabla 2.1. Las ocho regiones naturales o pisos ecológicos del Perú, (Brack, 2 000).

Región	Altitud	Clima
Costa o Chala	Hasta 500 m.s.n.m. (occidente)	Desértico subtropical y semitropical de tipo sabana tropical
Yunga (marítima)	500 – 2 300 m.s.n.m.	Cálido subtropical y árido y semitropical y húmedo (al norte)
Quechua	2 300 – 3 500 m.s.n.m.	Templado
Suni o Jalca	3 500 – 4 100 m.s.n.m.	Frío y seco
Puna	4 100 – 4 800 m.s.n.m.	Muy frío (-9°C ~ -25°C)
Janca o Cordillera	Desde 4 800 m.s.n.m.	Gélido
Selva alta o Rupa - Rupa	400 – 1 000 m.s.n.m. (oriente)	Cálido y húmedo (4000 mm de lluvia al año)
Selva baja u Omagua	Hasta 400 m.s.n.m. (oriente)	Tropical

### 2.2.3. Aspectos arquitectónicos de diseño

Dentro de los criterios a tener en cuenta al momento de realizar un diseño de una edificación se tienen los siguientes.

#### 2.2.3.1. Ubicación y orientación

La ubicación se refiere más a la orografía del lugar, los alrededores y las condiciones climáticas en general y cómo estos afectarían a la edificación. La orientación se refiere más a la posición de

la vivienda respecto al eje Norte-Sur, haciendo hincapié en que en el hemisferio sur las superficies orientadas hacia el norte son las más favorecidas con la incidencia de radiación solar.



Figura 2.8. La ubicación seleccionada para una vivienda tiene una gran influencia. En la figura se observa que la vivienda de la izquierda será irradiada por el sol todo el día, mientras la vivienda de la derecha estará en la sombra y con vientos frecuentes, (García, 2 009).

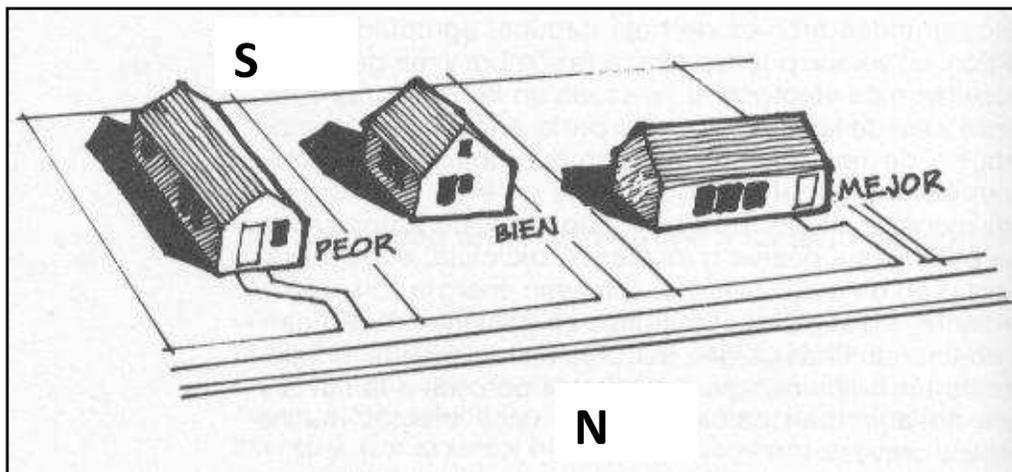


Figura 2.9. En general, una vivienda debe favorecer la mayor superficie posible orientada al norte, (www.casasconfortables.net, 2 009)

### 2.2.3.2. Distribución

En busca del uso adecuado de las condiciones climáticas disponibles y de lograr la eficiencia energética en la edificación, la distribución e interconexión de los espacios es un tema vital, ya que ello permitirá distribuir la energía adecuadamente en los ambientes y así, procurar mayor confort y menor uso de energía convencional, todo esto tomando en cuenta los patrones de uso de los ambientes.

Por ejemplo; se recomienda ubicar ambientes como la sala, comedor, cocina (ambientes más usados en el día) en el lado norte de la edificación, ya que estos ambientes serán favorecidos por la radiación solar a lo largo del año; en la zona este es recomendable ubicar los dormitorios (los cuales serán iluminados y calentados por el sol en las mañanas) y en la zona oeste los talleres y lugares de trabajo, dejándose ambientes de paso como escaleras, pasillos o almacenes en la zona sur (por tener condiciones de confort menos estrictas).

Es recomendable ubicar los ambientes donde hay generación de calor (como cocinas o ambientes con maquinarias) en las plantas bajas, ya que al calentarse el aire de estos ambientes por el calor generado, este se elevará, pudiendo ser aprovechado para calentar ambientes ubicados en las plantas altas.

Algunas veces los ambientes de trabajo orientados en la zona norte del edificio pueden necesitar de un “espacio tapón” el cual se ubicará entre la radiación solar incidente y el ambiente de trabajo, evitando sobrecalentamientos. Estos “espacios tapón” pueden ser almacenes, armarios, garajes, etc.

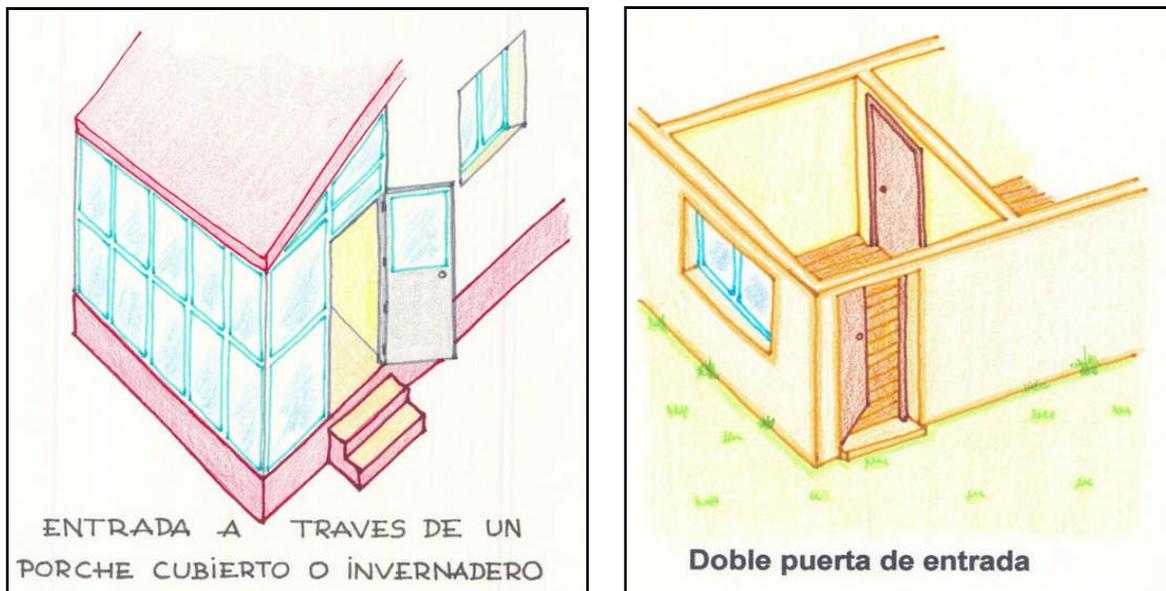


Figura 2.10. Espacios tapón. A la izquierda entrada a través de un invernadero. A la derecha entrada a través de un espacio de doble puerta, (García, 2 009).

En general, dependiendo de los requerimientos arquitectónicos, urbanísticos, estéticos y térmicos (favorecimiento de ciertos ambientes) estos criterios pueden variar.

### 2.2.3.3. Geometría

Es conocido que mientras más área de contacto con el exterior disponga una edificación, mayores serán las ganancias o pérdidas de energía con el exterior, esto puede ser perjudicial en climas extremos (muy fríos o muy cálidos), pero puede ser beneficioso en climas templados; por

otro lado, reducir el área de contacto con el exterior implicaría disminuir la superficie norte expuesta a la ganancia solar, lo cual puede no ser conveniente, una opción de solución podría ser manteniendo la pared norte alargada y procurando un buen aislamiento para las demás superficies. **En general, la opción a seleccionar depende del criterio que uno plantee y las acciones que uno tome para corregir los defectos asociados a la opción seleccionada.**

Uno de los criterios más usados es el del factor de forma, el cual es la relación Área/Volumen. Este criterio plantea que para climas muy cálidos o muy fríos el factor de forma debería ser menor que para climas templados.

Una geometría interesante para climas fríos es la trapezoidal, en la cual la pared orientada al norte (la más larga) recibe la radiación solar y la pared orientada al sur (la más corta) se encuentra aislada térmicamente.

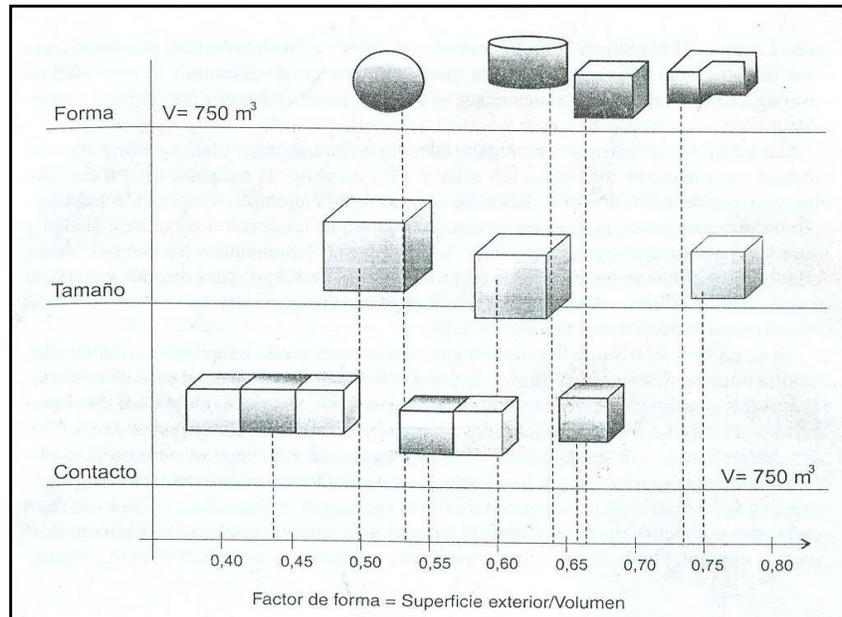


Figura 2.11. Valores del factor de forma en el caso de distintas geometrías teniendo en cuenta tanto la forma como la altura y la distancia de las edificaciones, (Ibañez, 2 005).

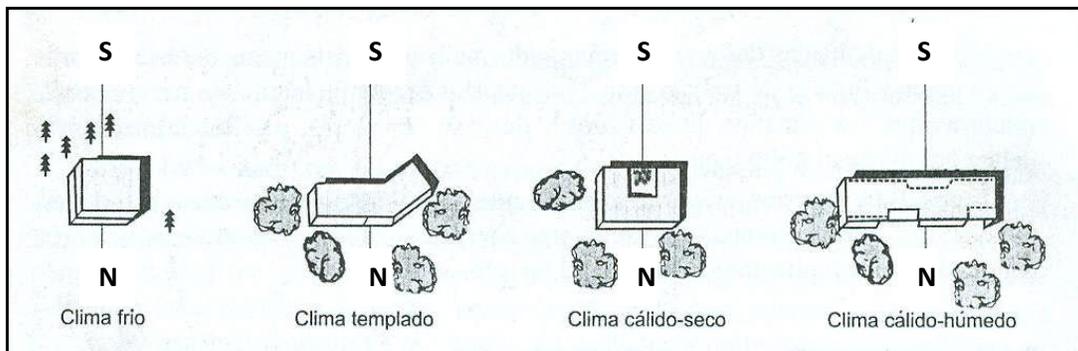


Figura 2.12. Geometrías adecuadas para optimizar el comportamiento térmico de los edificios en función del tipo de clima, (Ibañez, 2 005).

#### 2.2.3.4. Materiales y almacenamiento de energía

Dependiendo de las características físicas, geométricas y ambientales de los materiales que conforman muros, techos y suelos de una vivienda; las condiciones climáticas exteriores pueden influir en mayor o menor grado sobre las temperaturas de los ambientes interiores. Así pues, se habla de la inercia térmica de una pared como la capacidad de retener o almacenar el calor (incidente del sol o proveniente del día), de redistribuirlo en la misma pared y de re-emitirlo de noche a la vivienda.

Por ej., si trabajásemos con muros de materiales ligeros, estos se calentarían o enfriarían en fase con la temperatura exterior o la incidencia del sol; sin embargo, si trabajásemos con materiales densos y de gran espesor, este material almacenaría mucho más calor, de tal forma que la oscilación de temperaturas en los muros sería menor (y más lenta) que en el caso de materiales ligeros. En general, la redistribución del calor almacenado hacia el interior de la vivienda se puede dar con un desfase de horas (asociado esto a la conductividad térmica del material). Se dice que un muro tiene una gran inercia térmica mientras más desfase genere a la onda de calor (almacenamiento de día y reemisión de noche).

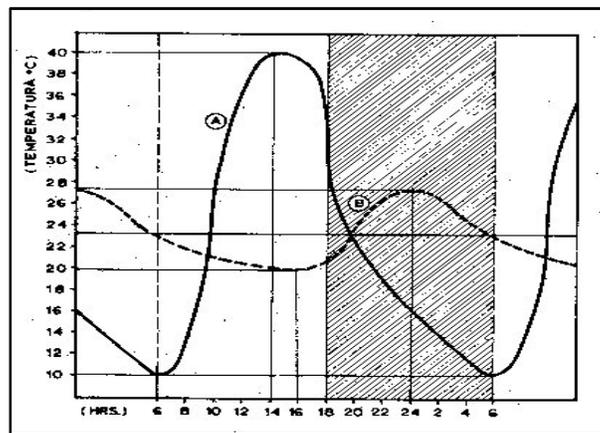


Figura 2.13. Curva A, variación de temperatura exterior. Curva B variación de temperatura superficial interna correspondiente a un muro de adobe de 25 cm de espesor.

Se hace evidente que la capacidad de almacenamiento y reemisión de la energía almacenada por un muro (por ej.) va a depender del juego de tres propiedades físicas: calor específico, densidad y conductividad térmica. La combinación de estos tres parámetros es lo que determina la inercia térmica del muro y de cualquier otro elemento constructivo.

#### 2.2.3.5. Normativas

Al momento de hacer un diseño es necesario tomar en cuentas las normativas vigentes del lugar. Así por ej., es cada vez más importante en los países europeos la búsqueda de eficiencia energética, por ello, las construcciones se adecuan a normativas que buscan confort: lumínico, térmico, acústico, etc., usando el mínimo de energía convencional posible. Este aspecto, junto otras normas convencionales (constructivas, eléctricas, sanitarias, ambientales, etc.), pueden

influir grandemente en una propuesta de diseño. Otros factores a tomar en cuenta son las normas urbanas (orientación, disponibilidad de terreno) y los materiales disponibles. Para el caso peruano se debería acelerar la elaboración de normas técnicas nacionales, partiendo de la incorporación de “técnicas constructivas bioclimáticas” en las edificaciones nacionales (rurales).

#### 2.2.4. Elementos constructivos

A continuación se hará una breve descripción de los elementos de la vivienda que influyen en las condiciones de confort al interior y se comentarán algunas estrategias a adoptar.

##### 2.2.4.1. Techos y suelos

Sin lugar a dudas el techo es el elemento constructivo donde hay una mayor incidencia de radiación solar a lo largo del día; por ello, en climas muy cálidos o muy fríos se recomienda procurar un techo adecuadamente aislado para evitar ganancias o pérdidas excesivas; en climas templados se puede disponer de techos ligeros. El suelo, igualmente puede constituirse en un sumidero de calor y una fuente importante de pérdidas, se recomienda tenerlo aislado.

##### 2.2.4.2. Perforaciones y aberturas

Conformado por ventanas y puertas, jugando, especialmente la primera, un rol fundamental en el comportamiento energético de la vivienda. El uso adecuado de ventanas puede procurar confort térmico y lumínico en los ambientes interiores, ya que a través de estas, ingresa radiación solar directa y difusa.

En climas fríos, por ejemplo, se recomienda grandes ventanas en las paredes orientadas al norte en pos de ganar energía solar directamente hacia los ambientes interiores; no obstante, durante las noches las pérdidas de energía a través de los vidrios pueden ser considerables; es por ello que se recomienda usar una cubierta aislante durante las noches. En verano, para evitar sobrecalentamientos, las ventanas deberán disponer de elementos de sombreamiento. En la fachada sur deberán procurarse aberturas pequeñas.

Para climas cálidos es adecuado procurar ventanas con el fin de generar confort lumínico, sin llegar a sobrecalentamientos; para ello se debe disponer de elementos de control y sombreamiento (persianas, cubiertas, voladizos, etc.).

En climas templados la situación es un poco más compleja ya que debe priorizarse un buen sistema de iluminación natural, ganancias adecuadas en invierno y ventilación y sombreamiento en verano.

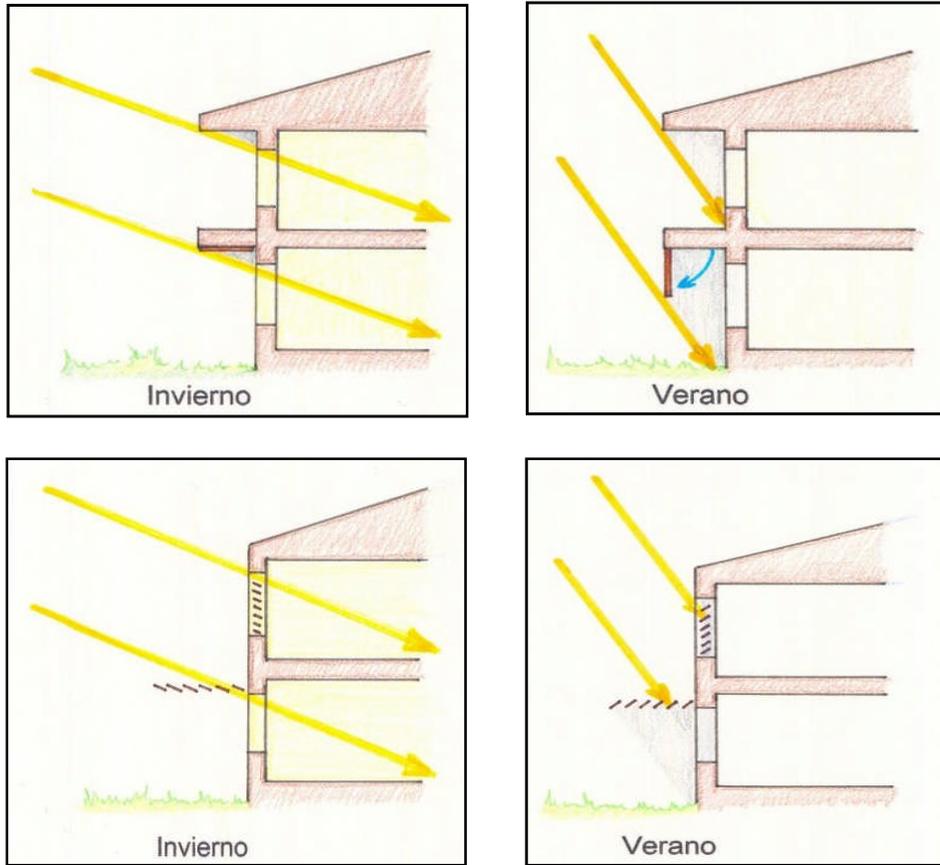


Figura 2.14. Ingreso de radiación solar a través de las ventanas. Sistemas de regulación de radiación según la época del año. Arriba por medio de voladizos y pantallas. Abajo por medio de lamas direccionables, (García, 2 009).



Figura 2.15. Edificio con sistema de captación de radiación solar a través de ventanas. España.

Debido a la importancia de estos elementos se han desarrollado (y se vienen desarrollando) tecnologías interesantes, alguna de las cuales pasamos a mencionar.

- **Ventanas de doble o triple acristalamiento;** en las cuales entre vidrio y vidrio hay aire u algún otro gas como Argón o Kriptón (que funcionan como aislantes térmicos); estos acristalamientos reducen la energía solar que ingresa pero evitan pérdidas de energía en las noches.
- **Vidrios de baja emisividad;** en los cuales el vidrio emite baja radiación infrarroja y por lo tanto se enfría menos; esto se logra con un recubrimiento superficial que se le hace al vidrio, logrando además reflejar al interior de la vivienda la radiación infrarroja incidente y permitiendo el paso de la radiación solar.
- **Vidrios absorbentes de calor;** los cuales contienen tintes especiales que permiten la absorción de hasta un 45% de la energía solar incidente.
- **Vidrios reflectantes;** se obtienen tras su recubrimiento con una película reflectiva.
- **Materiales plásticos transparentes;** muy interesantes debido a su ligereza, flexibilidad, robusticidad y facilidad de manejo; entre estos materiales se tienen: policarbonato, acrílico, poliéster, fluoruro de polivinilo, polietileno; no obstante su tiempo de vida es menor al vidrio.
- **Otras tecnologías;** este tipo de materiales se han desarrollado en los últimos años y su comercialización en el mercado es cada vez mayor, nos referimos a los cristales cromogénicos (ventanas inteligentes); estos sistemas trabajan en dos modos: en un modo permiten el paso de la luz y en el otro modo se hacen opacos y reducen su conductividad térmica. Además, pueden controlarse de manera autónoma (dependiendo del nivel de luminosidad y de las condiciones del clima) o de manera manual.

Si bien en la actualidad se dispone de multitud de sistemas, la selección de una u otra opción siempre dependerá de un criterio de satisfacción de necesidades, practicidad y economía.



*Figura 2.16. Ventanas inteligentes. A la izquierda estado claro. A la derecha estado oscuro.*

### 2.2.4.3. Paredes y aislamientos

Las paredes cumplen una función de acumulación de energía, notándose además que las ganancias o pérdidas de calor entre la vivienda y el exterior se dan, en un gran porcentaje, a través de las paredes de la envolvente. Por otro lado, las paredes cumplen la función de delimitar espacios, permitiendo, según la distribución y las propiedades físicas del material, la transferencia de calor desde ambientes más cálidos a más fríos.

En climas fríos es adecuado contar con aislamientos térmicos en los muros de la envolvente (sobre todo en los orientados al sur), este aislamiento puede realizarse en la superficie interior o exterior de la pared; permitiendo, en el primer caso, una retención del calor en el aire de los ambientes; y en el segundo caso, una acumulación de calor también en las paredes, lo cual genera una disminución en la amplitud de temperaturas del aire. Es importante tomar en cuenta las propiedades físicas de los materiales y el color de las superficies, ya que un color oscuro permite una mayor absorción de la radiación solar.

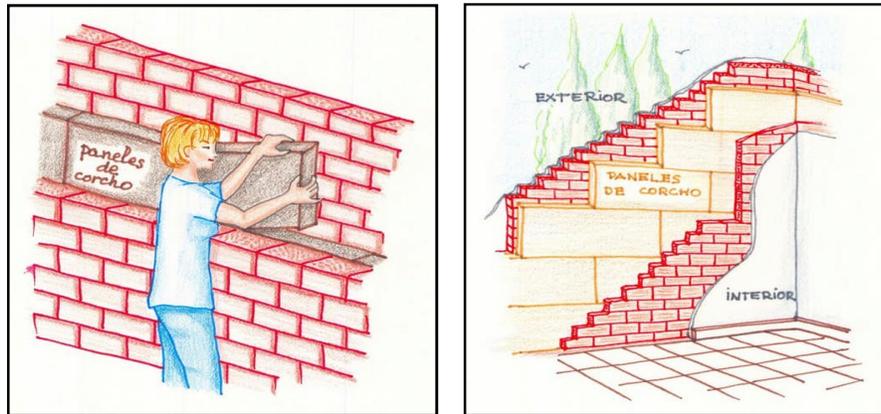


Figura 2.17. Aislamiento de paredes. Se muestra la técnica del doble muro, en el espacio entre muro y muro se coloca un aislante térmico, en este caso paneles de corcho, (García, 2 009).

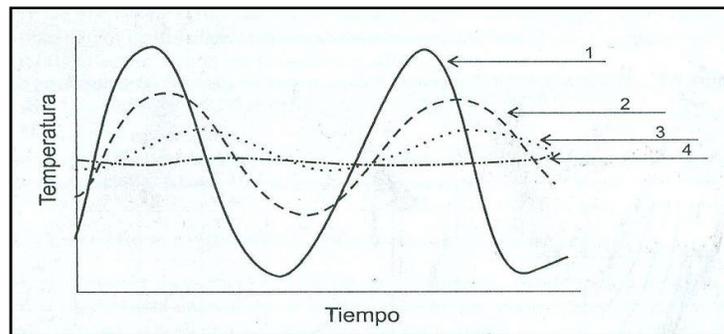


Figura 2.18. Evolución temporal de forma de la temperatura ambiente interior (t.a.i.), en edificios con distintos tipos de cerramientos. 1: t.a.e temperatura exterior.; 2: t.a.i. en cerramiento ligero; 3: t.a.i. en cerramiento pesado; 4: t.a.i. en edificio semienterrado, (Ibañez, 2005).

#### 2.2.4.4. Elementos de protección y control solar

Como se mencionó, las ventanas conforman una de las mayores fuentes de ganancia de energía; sin embargo, en algunos casos (sobre todo en verano y en zonas cálidas) un inadecuado control puede generar sobrecalentamientos y condiciones de discomfort, por ello es muy común el uso de dispositivos de protección solar asociados a las ventanas.

Estos elementos de protección se pueden clasificar en tres grupos: interiores, intermedios y exteriores.

**Los exteriores**, conformados principalmente por parasoles, tienen la característica que bloquean (absorben o reflejan) la radiación solar evitando que incida en el vidrio.

**Los intermedios** se ubican en el espacio entre las ventanas de doble o triple vidrio (por ej. los recubrimientos absorbentes). **Las protecciones interiores**, por ej. persianas, cubiertas, etc., permiten un control más preciso de las necesidades de iluminación y ganancia de calor.

La función ideal de estos elementos se puede resumir en: permitir el ingreso de energía solar durante el invierno junto con una buena iluminación y bloquear (hasta cierto punto) la radiación solar en verano, para lo cual se pueden contar con parasoles exteriores. Para el caso de parasoles exteriores se recomienda tener en cuenta la siguiente relación (Ibañez, 2005).

= -

(2.11)

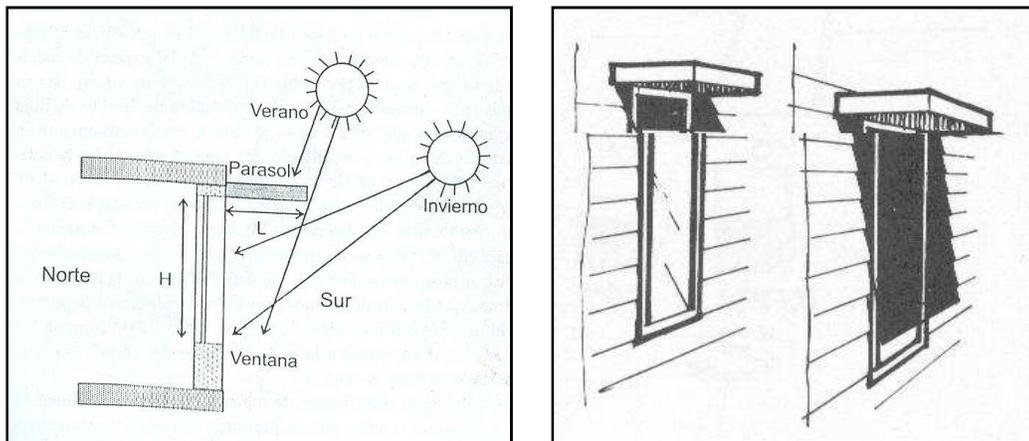


Figura 2.19. Elementos de sombreado, a la izquierda se muestra los parámetros mencionados en la ecuación anterior, (Ibañez, 2005)

Tabla 2.2. Relación entre la anchura del parasol,  $L$ , y la altura de la abertura  $H$ , (Ibañez, 2005).

Latitud Sur	F
28	5.6 - 11.1
32	4.0 - 6.3
36	3.0 - 4.5
40	2.5 - 3.4
44	2.0 - 2.7
48	1.7 - 2.2
52	1.5 - 1.8
56	1.3 - 1.5

#### 2.2.4.5. Influencia del entorno

La influencia de jardines o fuentes de agua cercanos a la edificación resulta agradable a la vista y, por otro lado, puede generar ciertas condiciones de confort en el ambiente, estas se mencionan a continuación.

##### 2.2.4.5.1. Influencia de la vegetación

Alguno de los efectos más importantes de contar con vegetación cercana a la edificación son: generación de sombras para proteger la edificación de sobrecalentamientos, protección natural a vientos fríos, generación de humedad y fuente radiante de calor nocturna (debido al efecto pantalla que posee).

La generación de sombras puede ser usado convenientemente, por ej.: en climas cálidos, una plantación de árboles de hoja perenne, cercanos a la fachada norte, permitirá el bloqueo de la radiación solar en un buen porcentaje, lográndose evitar sobrecalentamientos. Por otro lado, si los árboles son de hoja caduca, durante el invierno permitirán el paso de la radiación solar y durante el verano la bloquearán, esto es recomendable para climas templados; no obstante, en climas fríos no se recomienda usar esta técnica si en la fachada norte se han instalado dispositivos de captación de radiación solar (ventanas, muros acumuladores, etc.), ya que la disminución de radiación incidente por efecto de las ramas es considerable.

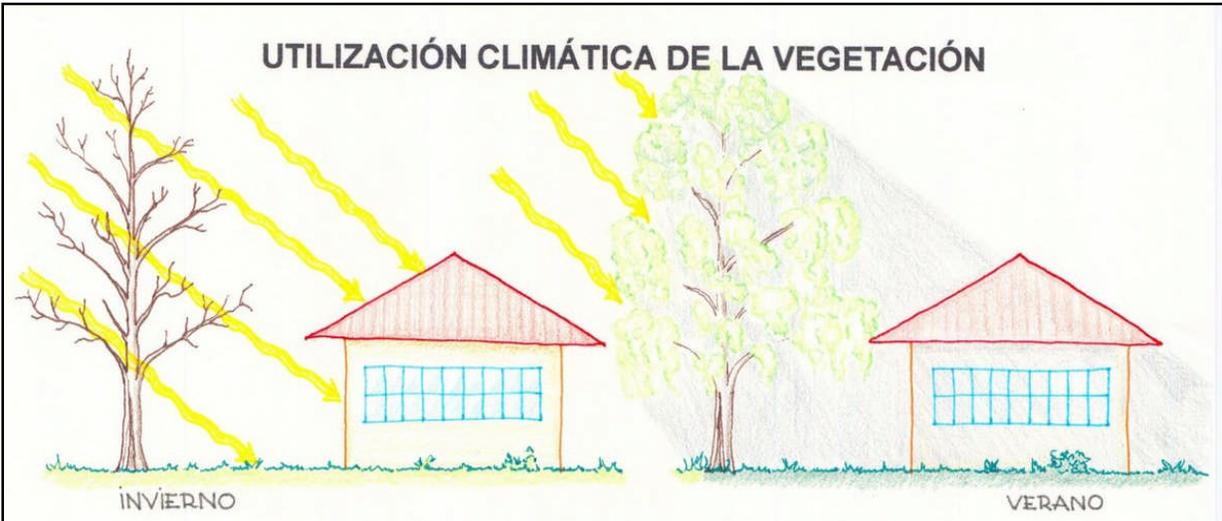


Figura 2.20. Generación de sombras según la estación, a través de uso de árboles, (García, 2 009).

La protección contra vientos fríos es adecuada en la fachada sur, ya que en esta, gran parte del año no incide radiación solar; una cortina de árboles (también conocido como cortavientos) ubicados a una distancia de 30 veces la altura del árbol permitirá una protección adecuada de la edificación contra los vientos fríos (la máxima protección se logra ubicándolos a una distancia entre dos y cinco veces la altura del cortavientos). Por otro lado, una disposición adecuada de árboles puede generar una dirección preferente de vientos, (Ibañez, 2 005).



Figura 2.21. Barreras de protección contra vientos fríos usando cortinas de árboles, (García, 2 009).

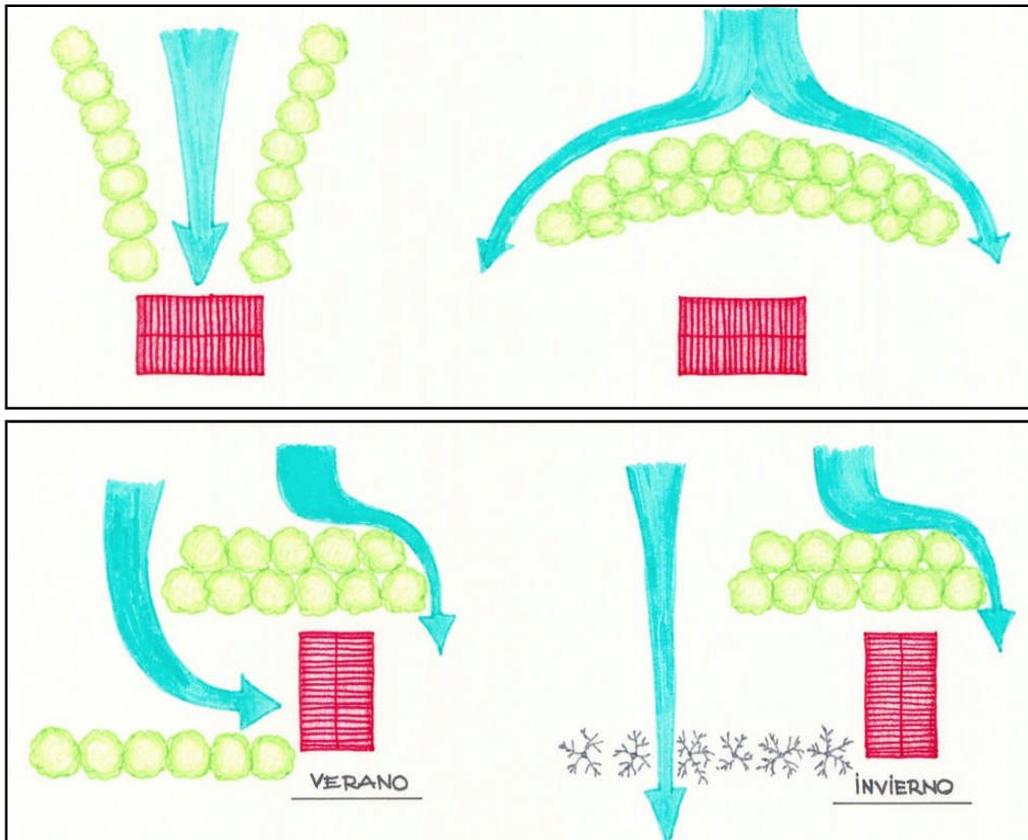


Figura 2.22. Arriba, canalización de brisas en verano y barrera cortavientos en invierno. Abajo, combinación de árboles de hoja caduca y perenne para canalizar brisas y frenar los vientos invernales, (García, 2 009).

Otras opciones existentes son la de las superficies arboladas, en las cuales las plantas, al ubicarse en las superficies, protegen de la radiación solar, oxigenan y refrescan el ambiente cercano a la edificación. En climas calurosos se puede recurrir al césped como reemplazante de pavimento, ya que este último genera una sensación de calor, debido a que refleja parte de la radiación solar incidente y la parte almacenada genera sobrecalentamientos nocturnos. Como siempre, la posibilidad de aplicación de estas técnicas dependerá de las condiciones del lugar.

#### 2.2.4.5.2. INFLUENCIA DEL AGUA

Grandes masas de agua (ríos, mares, lagos, océanos, etc.) o dispositivos acoplados a la arquitectura (piletas, fuentes, canales de riego, etc.) pueden lograr enfriamiento en zonas cálidas; esto debido a que durante el día, el agua absorbe calor del aire caliente (por convección) y al evaporarse (en la superficie) también absorbe calor del mismo agua, esto genera que disminuya la temperatura del aire y del agua haciendo más fresco los alrededores (en parte por la sensación de humedad). Por otro lado, demasiada humedad no es recomendable, siendo el límite de menor temperatura al que puede llegar el aire, igual a la temperatura de punto de rocío (que también depende de la humedad relativa).

Una técnica muy usada es la ubicación de masas de agua en jardines o plazetas dentro de la vivienda, lo cual genera enfriamiento del aire en este espacio abierto y en los alrededores.

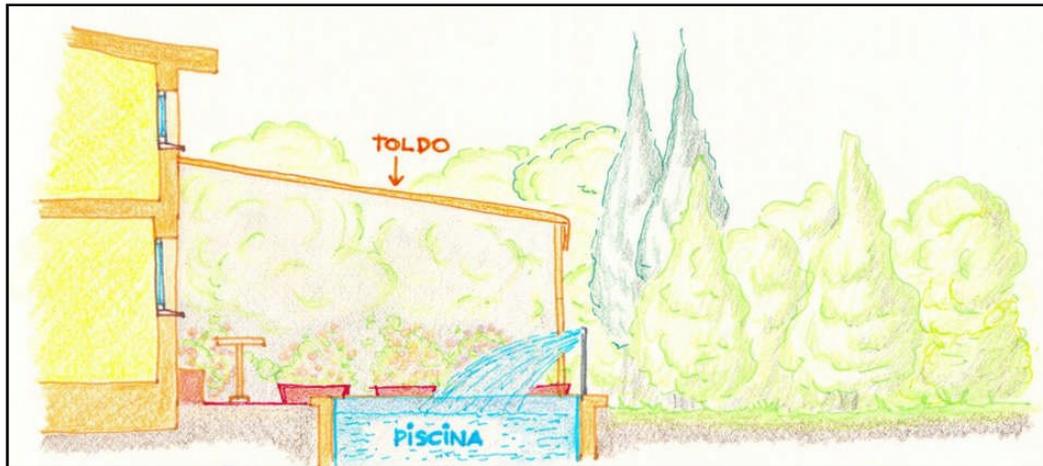


Figura 2.23. Una piscina cercana a un ambiente permite enfriamiento evaporativo y humidificación, (García, 2 009).

#### 2.2.4.6. Técnicas de iluminación

Una edificación energéticamente eficiente tiene que favorecer la iluminación natural. Existen técnicas que permiten obtener ambientes lumínicamente confortables a partir del uso adecuado de la radiación solar disponible durante el día. Algunas de las ventajas de este tipo de técnicas son que la iluminación natural de un ambiente evita el uso de sistemas de iluminación, los cuales, dependiendo de su eficiencia, generan calor convirtiéndose en una fuente indeseable en climas cálidos e innecesario y evitable en climas templados y fríos. De otro lado, hay normativas que establecen rangos de iluminación con que debe contar un ambiente a fin de ser lumínicamente confortable. Otra ventaja de la iluminación natural es que la luz más adecuada para la sensibilidad del ojo humano es la luz del sol.

Por ello, una edificación bien diseñada debe optimizar el uso de iluminación natural durante el día, adicionando elementos de control para evitar sobrecalentamientos y sobreiluminaciones, y así evitar un uso innecesario de luminarias y generación de calor a través de estos. Por otro lado, se debe procurar el uso de lámparas eficientes y de sistemas que permitan un control sobre estos elementos, según el nivel de luminosidad, la ocupación o algún horario de uso. Resumiendo, un buen diseño de iluminación natural buscará satisfacer adecuadamente las necesidades y reducir, en la medida de lo posible, el empleo de iluminación artificial en la situación más desfavorable, es decir, en días nublados.

Existen distintas técnicas para propiciar iluminación natural, en la figura siguiente se muestran los procedimientos más comunes y sus perfiles de iluminancia correspondiente.

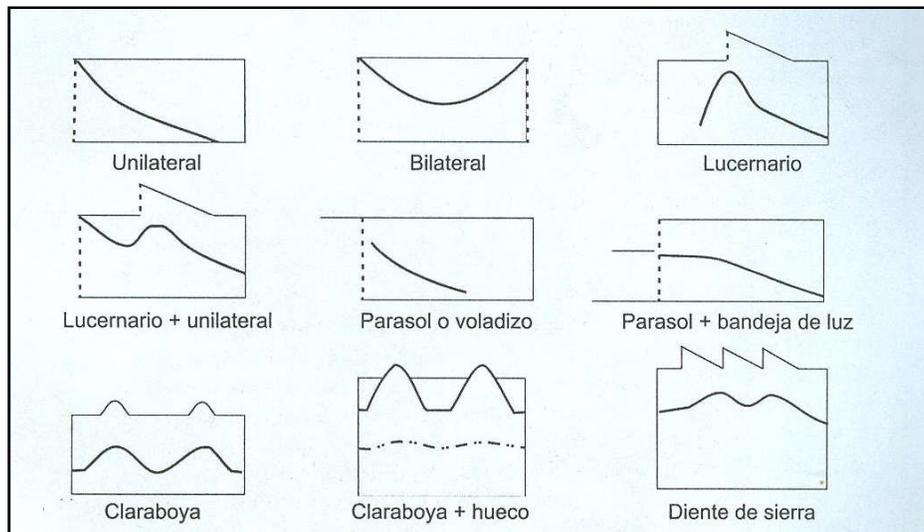


Figura 2.24. Procedimientos más comunes para el aprovechamiento de la iluminación natural a partir de aberturas en paredes y techos. Se muestran, asimismo y de forma aproximada, los perfiles de las distribuciones de iluminancias resultantes, (Ibañez, 2005).

#### 2.2.4.7. Sistemas convencionales de refrigeración, calefacción y ventilación

Si nos referimos a sistemas convencionales podemos mencionar básicamente dos tipos: aquellos que no generan un consumo energético y aquellos que sí. En el primer caso, los sistemas más usados son en ventilación a través de aberturas y ventanas, esto permite el ingreso de aire más fresco del exterior debido a una diferencia de temperaturas y presiones; no obstante, las dificultades se presentan en el control de esta ventilación y además, el límite del enfriamiento es igual a la temperatura del aire exterior.

En el caso de sistemas que generan consumo energético se tienen dos finalidades. Para calentamiento existen: estufas, calderas, bombas de calor, motores eléctricos, etc., siendo la energía proveniente de la quema de combustible fósiles, de electricidad u otro. En el caso de refrigeración, los equipos básicamente funcionan con electricidad.

Un buen diseño debe procurar un acondicionamiento de los ambientes, hasta donde sea posible, con el uso de recursos naturales, recurriendo al uso de equipos convencionales en caso sea necesario y debiendo ser estos eficientes en su consumo y en su control.

Cabe resaltar que la aplicación de estos sistemas para el medio rural altoandino es complicado, debido a los limitados recursos económicos que dispone la gente de estas zonas, y es innecesario debido a la existencia de opciones de aprovechamiento de los recursos naturales a través del uso de técnicas bioclimáticas.

## 2.2.5. Calefacción y refrigeración solar pasiva

La arquitectura solar pasiva busca lograr condiciones de confort al interior de los ambientes a través del calentamiento o enfriamiento, usando para ello la energía solar y las condiciones climáticas; todo esto de la mano con acciones y diseños que orienten siempre a una eficiencia energética.

### 2.2.5.1. Calefacción solar pasiva

Básicamente el calentamiento se logra de la siguiente forma: la radiación solar incidente es captada por una superficie colectora, esta energía es almacenada en una masa térmica, la energía almacenada es liberada posteriormente por convección o radiación en horas en que no hay luz solar, generando un calentamiento de los ambientes. También es posible calentar los ambientes en el mismo momento en que incide la radiación solar. Existen diferentes tipos de sistemas de calefacción solar pasiva, estos pueden dividirse en tres grupos: sistemas de ganancia directa, sistemas de ganancia indirecta y sistemas de ganancia aislada.

**Los sistemas de ganancia directa** permiten el ingreso de la radiación solar directamente a los ambientes interiores, siendo la energía almacenada en las mismas paredes y suelos, esto genera calentamiento durante el día (debido a la radiación solar incidente) y también calentamiento de noche (debido al calor almacenado y emitido por las paredes). Este tipo de sistemas lo conforman ventanas, claraboyas, luminarias, etc. Se estima que estos sistemas permiten un aprovechamiento de entre 60 y 75% de la energía solar que incide sobre los acristalamientos. El control de radiación solar incidente puede realizarse a través de sistemas manuales o automáticos (como ya se ha descrito).

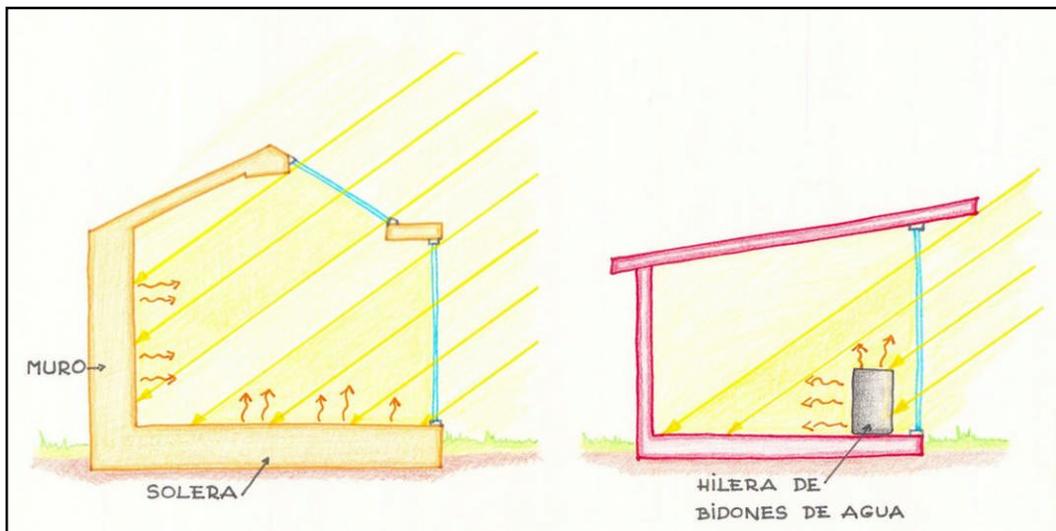


Figura 2.25. Sistemas de ganancia solar directa. A la izquierda, la energía se almacena en el muro y piso. A la derecha, la energía se almacena, además, en masas térmicas. (García, 2 009).

**En los sistemas de ganancia indirecta** la radiación solar incide sobre una masa térmica sin lograr ingresar a los ambientes interiores; dentro de estos sistemas se tienen: muros de almacenamiento, lechos de almacenamiento, cubiertas de agua, etc.; al no incidir la radiación solar directamente sobre las dependencias, permiten una mayor regulación y control de los flujos térmicos, si bien su rendimiento es menor, de hecho, se estima que estos sistemas aprovechan entre un 30 y 45% de la energía solar que incide en los acristalamientos. Otro aspecto a tomar en cuenta es la iluminación, ya que estos sistemas la dificultan, usualmente se opta por sistemas mixtos (directos e indirectos). Dentro de los sistemas de ganancia indirecta más conocidos se tienen los muros de inercia y lo muros Trombe.

**Un muro de inercia** consiste en un muro macizo, orientado al norte, de piedra, hormigón, ladrillo macizo, adobe, etc., de un espesor entre 25 y 40 cm, con la superficie exterior oscura y protegida con un vidrio (para aprovechar las ventajas del efecto invernadero) situado a unos 10 y 15 cm de esta. Durante el día la radiación solar incidente produce el calentamiento del muro, que acumula el calor y lo cede por radiación al interior del edificio, con un retardo de unas 12 horas (por la noche). Para evitar sobrecalentamientos en verano resulta conveniente protegerlo de la radiación solar y disponer de aberturas para poder ventilar el muro.



*Figura 2.26. Muro de inercia instalado en el CERT de la Universidad Jorge Basadre de Tacna.*

**Una variante del muro de inercia son los muros de agua**, en los cuales el agua (usualmente almacenada en bidones) se usa como material de almacenamiento de calor; esto debido a que presenta una mayor capacidad calorífica (por ej. cinco veces mayor que la del hormigón) y una conductividad térmica mucho mayor, esto genera una más rápida transferencia de calor hacia el interior. Usualmente se recomienda aislar el muro de agua del edificio durante el día (para evitar sobrecalentamientos) y retirar el aislamiento por la noches. El espesor óptimo del muro de agua está en torno a los 15 cm aproximadamente. Otra variante interesante la conforman los materiales de cambio de fase, los cuales aprovechan el almacenamiento de energía que se da al cambiar de fase (de sólido a líquido) a una temperatura cercana a la del ambiente (entre 30 y 40 °C); algunos materiales utilizados son las parafinas y grasas naturales (mantecas, etc.).

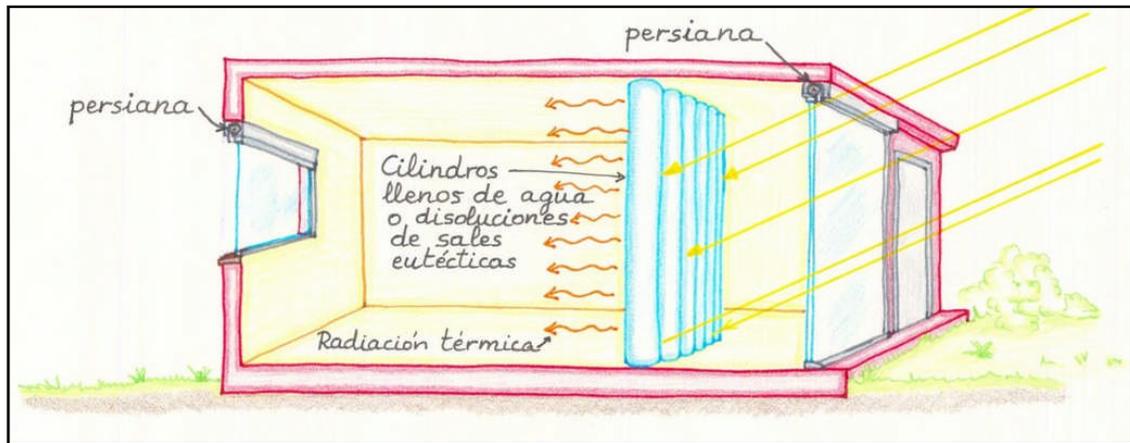


Figura 2.27. Muro de agua, el agua es almacenada en cilindros. (García, 2 009).

**El muro Trombe** es una variante del muro de inercia en la que éste dispone de unas rejillas o aberturas regulables situadas en la parte inferior y superior que permiten la circulación de aire desde la cámara (espacio entre la superficie exterior del muro y el vidrio) hacia el interior del edificio. Este sistema permite lograr un calentamiento del ambiente interior durante todo el día, ya que el aire caliente en la cámara ingresa al edificio en las horas de sol y por las noches, al cerrar las rejillas de circulación, el muro Trombe actúa como un muro de inercia, calentando el ambiente interior por convección y radiación. Un muro Trombe bien diseñado puede entregar el calor almacenado con un retardo entre 8 y 10 horas; el valor de la superficie total de las aberturas está entre el 0,5% y el 3% de la superficie total del muro. El muro Trombe también se puede utilizar para refrescar y ventilar los ambientes interiores, usando el efecto chimenea, en el cual se dispone de aberturas regulables en la parte superior del acristalamiento.

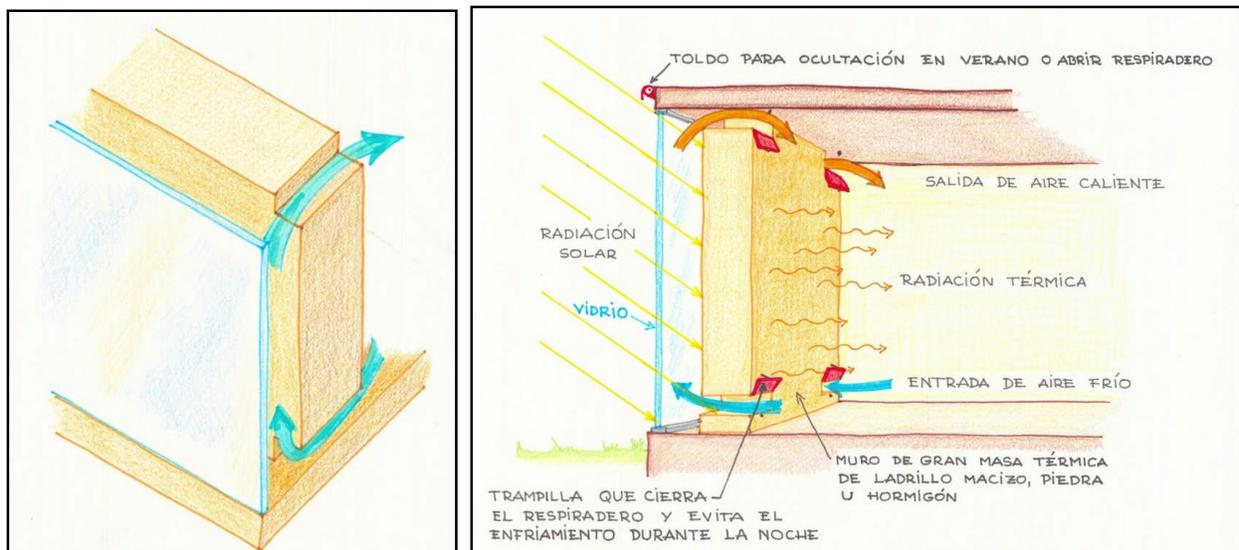


Figura 2.28. Muro Trombe. A la derecha se muestra el detalle de esta técnica. El aire frío sale del cuarto por las entradas inferiores y el aire caliente ingresa al cuarto por las entradas superiores, (García, 2 009).

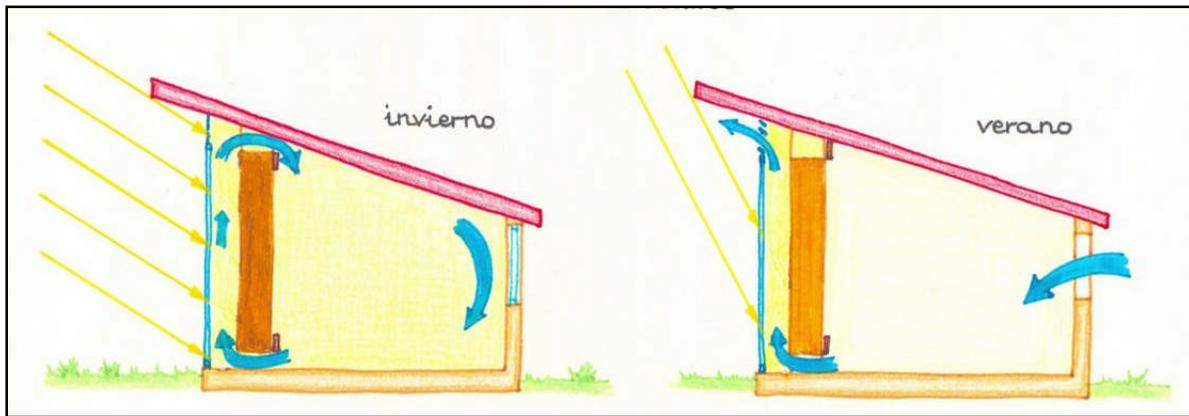


Figura 2.29. Uso del muro Trombe según la época del año. En invierno se usa para calentamiento y en verano para promover la ventilación, (García, 2 009).

**Los sistemas de ganancia aislada** están conformados por invernaderos, galerías, lecho de rocas, etc., estos sistemas se encuentran adosados al edificio o separados físicamente de este; se estima que la ganancia aislada permite la transferencia al edificio de entre un 15 y 30% de la energía solar incidente sobre las superficies de captación.

**En el caso de invernadero**, estos espacios se encuentran adyacentes al edificio con cerramientos mayoritariamente acristalados a fin de captar gran parte de la energía solar incidente; la superficie perpendicular a las paredes usualmente es mayor a 2 metro y la radiación solar al incidir en el suelo se almacena principalmente allí. Para aprovechar el calor almacenado se suele disponer de orificios en la pared común, similar al muro Trombe.

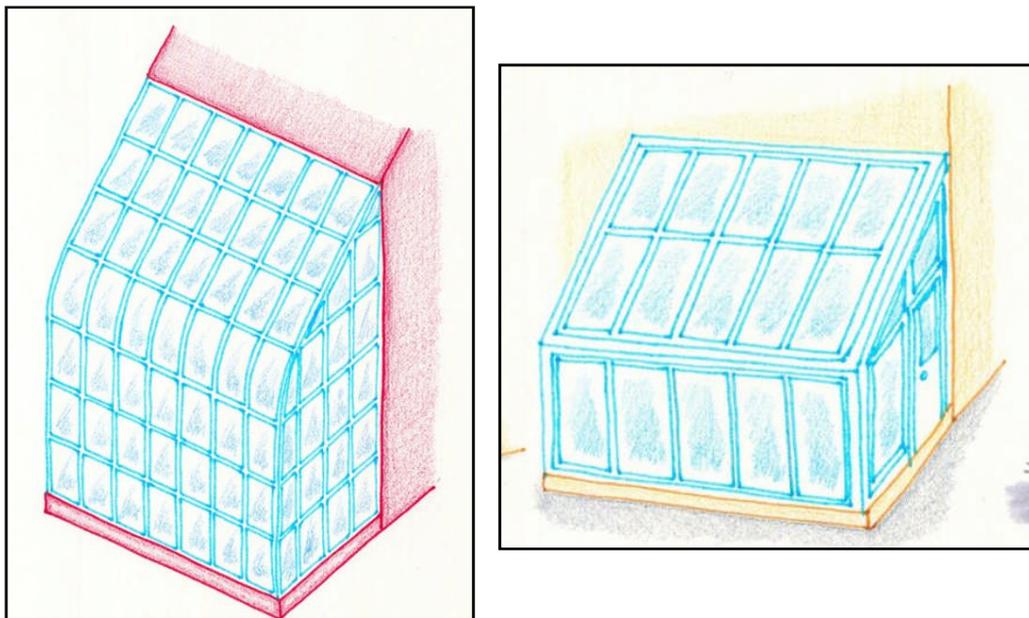


Figura 2.30. Sistemas de ganancia aislada. Invernaderos adosados a ambientes, (García, 2 009).

**Las galerías** son espacios similares a los invernaderos con la diferencia que la superficie perpendicular a las paredes (anchura) es usualmente inferior a 2 metros. **Los lechos de rocas**, situados normalmente debajo del edificio, son espacios llenos de rocas y cerrados con un acristalamiento en la parte donde incide la radiación solar; la energía solar es captada y almacenada en las rocas para ser cedida posteriormente al edificio ya sea por conducción, radiación o por convección natural o forzada mediante circulación de aire desde el lecho de rocas hacia el interior del edificio.

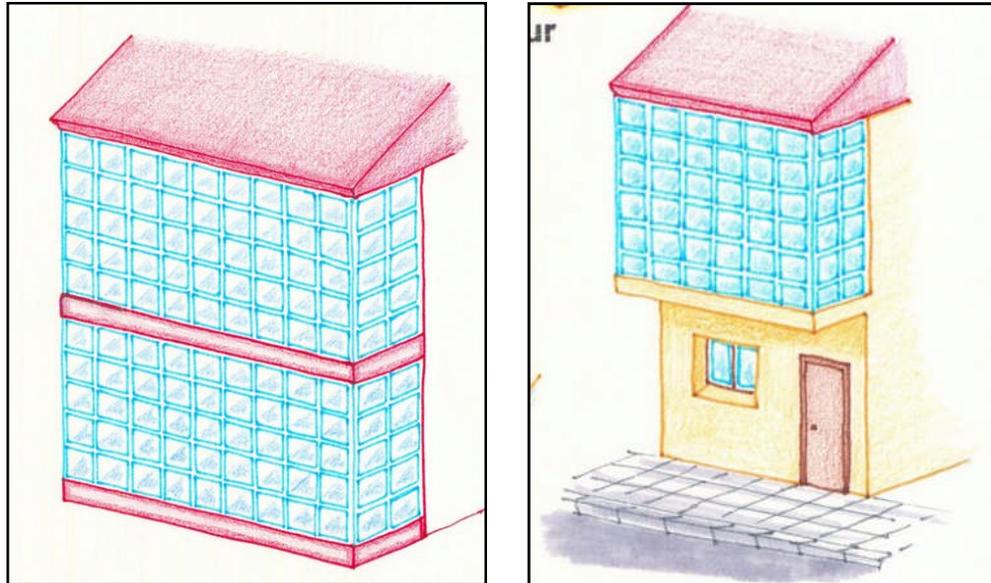


Figura 2.31. Sistemas de ganancia aislada. Galerías adosadas a ambientes, (García, 2 009).

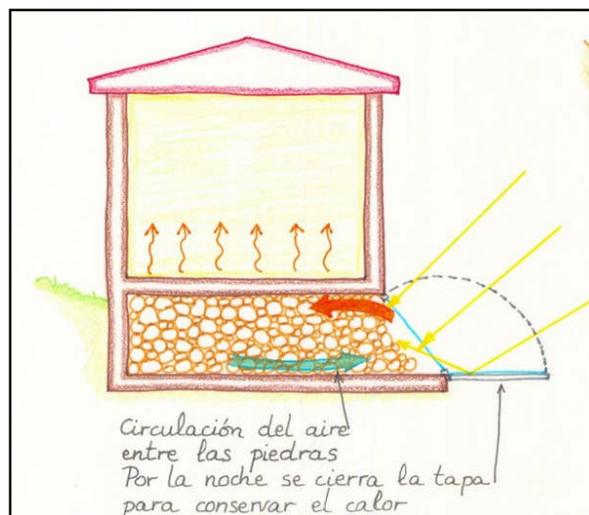


Figura 2.32. Lecho de roca, (García, 2009).

### 2.2.5.2. Sistemas de refrigeración solar pasiva

Estos sistemas se apoyan básicamente en cuatro principios: reducción al máximo de la entrada de calor proveniente del exterior, minimización de las aportaciones internas de calor (debido a ocupantes o equipos), evacuación de calor excedente del edificio y refrigeración de los locales.

**Reducción de cargas externas;** consiste en evitar sobrecalentamientos por la radiación solar incidente, para ello se eligen orientaciones y geometrías adecuadas así como colores claros y aislamiento térmico en paredes y techos; también se opta por cubiertas y sombreamientos principalmente en las fachadas este, norte y oeste, para ello se utilizan sistemas ya descritos anteriormente (parasoles, cubiertas fijas, móviles, etc.).

**Reducción de cargas internas;** logrado a través del uso de equipos (luminarias, equipos eléctricos, etc.) más eficientes y disminuyendo la densidad de ocupación de los locales.

**Evacuación del calor excedente;** logrado a través de la ventilación, lo que permite la sustitución del aire sobrecalentado del interior por aire exterior a menor temperatura. La ventilación proporciona sensación de frescor debido a los fenómenos de convección y evaporación que produce en la piel humana. Por lo general, para mantener un nivel adecuado de confort la velocidad del aire no debe exceder un determinado valor que depende de la temperatura ambiente, estos valores se muestran en la tabla 2.3. Cabe mencionar que el nivel de confort puede variar de un individuo a otro y está influenciado por el grado de humedad del aire.

*Tabla 2.3. Velocidades orientativas del aire recomendadas según la temperatura, (Ibañez, 2 005).*

<b>Temperatura (°C)</b>	20°	26°	27.8°	29.4°
<b>Velocidad máxima (m/s)</b>	0.15	0.25	0.8	1

Para lograr una ventilación más controlada es recomendable emplear orificios en la parte superior de los ambientes, con deflectores y rejillas o bien mediante marcos con aberturas variables. En verano es aconsejable ventilar durante las noches y únicamente cuando la temperatura del aire exterior sea inferior a la del interior; por otro lado, en ambientes húmedos se puede proporcionar sensación de frescor aún a pesar que la temperatura exterior sea superior a la interior.

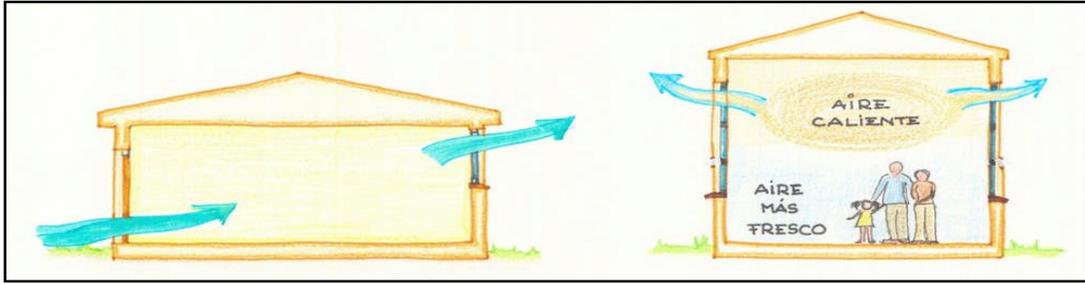


Figura 2.33. Sistema de ventilación controlada a partir del uso de orificios en la parte superior, (García, 2 009).

Una opción interesante para zonas cálidas con abundantes vientos frescos en una dirección predominante son las torres de viento, estos sistemas consisten en unos salientes por encima de las cubiertas, orientados en el sentido opuesto a la dirección del viento a fin de captar y conducir el aire fresco hacia el interior del edificio.

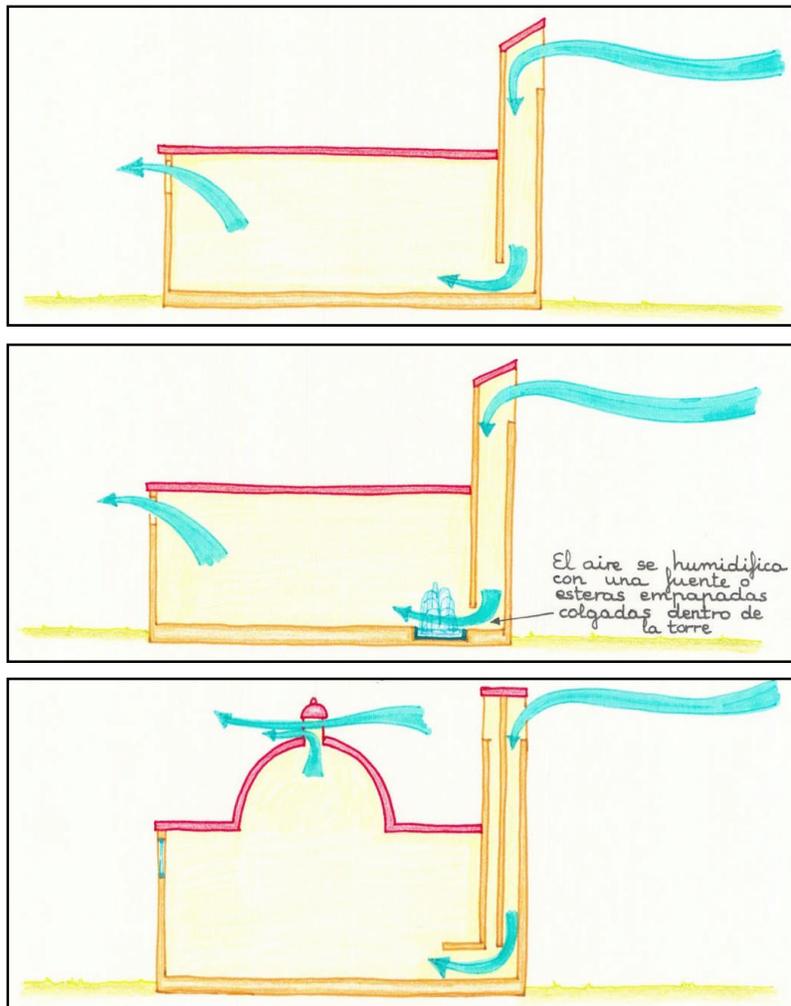


Figura 2.34. Torres de viento. De dirección constante, torre evaporativa y torre de paredes cruzadas. (García, 2 009).

Otra forma de lograr la ventilación natural es a través del uso del efecto chimenea, en el cual la radiación solar calienta el aire contenido en un recinto (denominado chimenea solar) y como consecuencia el aire, de menor densidad, tiende a ascender y salir al exterior, forzando la creación de una corriente de aire fresco del exterior que penetra en el edificio para reemplazarlo.

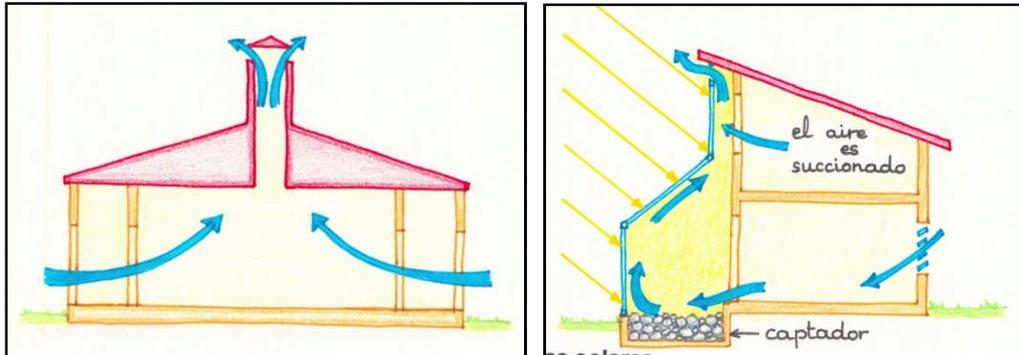


Figura 2.35: Sistemas de ventilación natural usando el efecto chimenea (chimeneas solares) , (García, 2009).

**Refrigeración;** básicamente existen tres tipos de sistemas: refrigeración evaporativa, sistemas de enfriamiento nocturno y los sistemas de intercambio con el terreno.

**La refrigeración evaporativa** tiene su efecto al colocar masas de agua cercanas a la edificación tales como: estanques y fuentes interiores en patios, cubiertas inundadas, aspersión de agua en las cubiertas, etc., el principio de enfriamiento ya se ha explicado en las secciones anteriores.

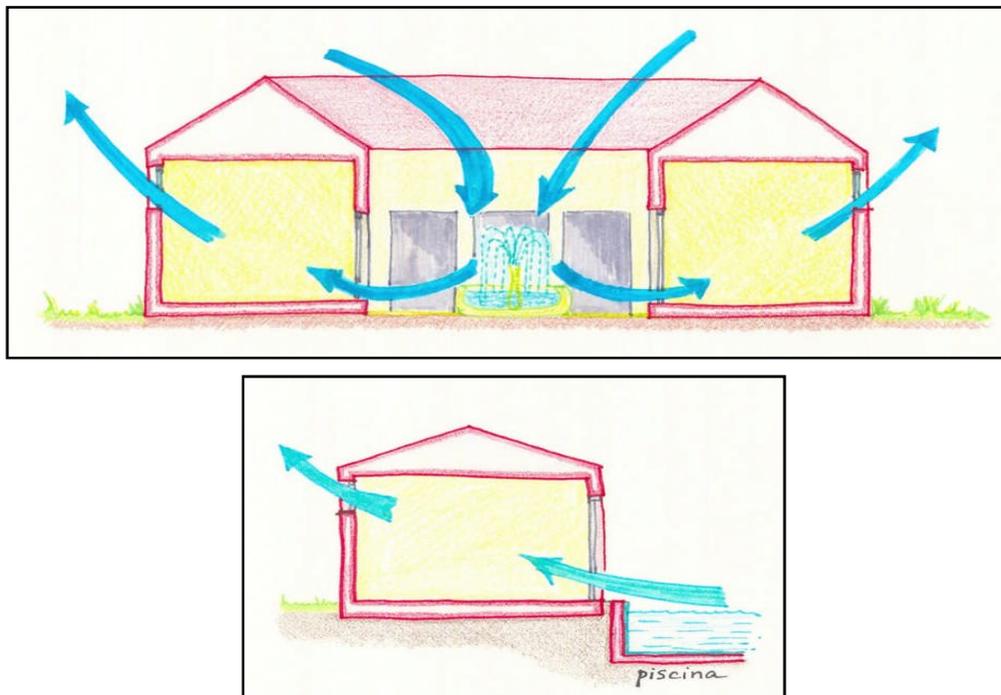


Figura 2.36. Sistemas de refrigeración evaporativa a través del uso de piletas o piscinas (García, 2 009).

**Los sistemas de enfriamiento nocturno** aprovechan el enfriamiento por radiación nocturna (originado por la radiación térmica de las superficies del edificio hacia el exterior) y la menor temperatura del aire nocturno (ventilación inducida nocturna). Un ejemplo de aplicación de esta técnica es en las construcciones de patio interior, especialmente en climas cálidos secos, ya que durante las noches los patios y las construcciones que los rodean ceden calor hacia el firmamento por radiación, enfriándose (con la ayuda adicional de los mecanismos de ventilación nocturna y evaporativa) y originándose una bolsa de aire enfriado que contribuye a refrescar el propio patio y las estancias que lo rodean.



Figura 2.37. Un patio dentro de la edificación funciona como un sistema de enfriamiento por radiación nocturna, (García, 2 009).

**Los sistemas de intercambio térmico con el terreno o intercambiadores geotérmicos** pueden utilizarse tanto para refrigerar como para calentar según la época del año de que se trate, ya que se usa el terreno como fuente o sumidero de calor; para esto se hace circular aire por el interior de un conducto, enterrado en el terreno una longitud suficiente para que se produzca un enfriamiento o calentamiento del aire, ya que el terreno se mantiene a una temperatura bastante uniforme a lo largo del año: inferior a la temperatura del aire en verano y superior en invierno (especialmente a varios metros de profundidad). El aire puede circular mediante convección natural o convección forzada, con la asistencia de ventiladores y turbinas.

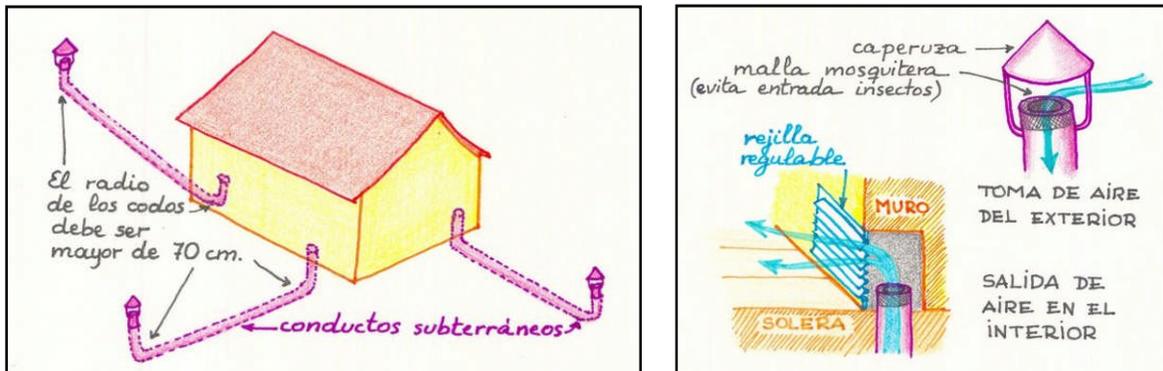


Figura 2.38. Sistema de intercambio térmico con el terreno, (García, 2 009).

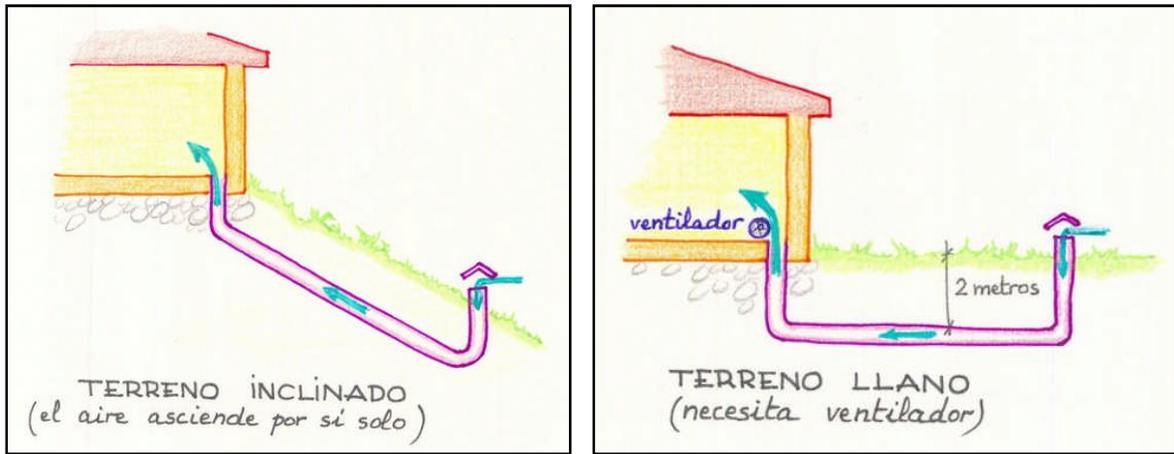


Figura 2.39. Sistema de intercambio térmico con el terreno, (García, 2 009).

## 2.3. TÉCNICAS COMPUTACIONALES

Es innegable que el avance computacional asociado a temas de investigación en ciencia e ingeniería ha llegado a niveles muy altos en las últimas décadas; así pues, actualmente es posible acceder a programas de simulación computacional de procesos en temas como: mecánica de fluidos, reacciones químicas, nanotecnología, circuitos electrónicos, procesos nucleares, etc. En particular, el avance en simulación computacional en el campo de transferencia de energía en distintos procesos térmicos también ha tenido un desarrollo considerable, esto canalizado en el lanzamiento de programas de simulación energética de carga térmica. En el tema de edificaciones, de hecho, aquellos países que actualmente están implementando normativas para lograr una eficiencia energética previamente (e indispensablemente) han pasado por un proceso de apropiación de técnicas de simulación computacional a través del uso de programas de simulación energética para edificaciones.

En los anexos se describe con cierto detalle el software de simulación energética en edificios Energy Plus, el cual fue desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos en la sección de Eficiencia Energética y Energías Renovables. Este software se utilizó para llevar a cabo la presente tesis, es por ello que amerita una descripción adecuada del mismo. En las siguientes secciones se muestran las consideraciones realizadas por el software para simular los procesos físicos que se llevan a cabo en un edificio, todo esto con la finalidad de lograr una idea de qué diseños son los más energéticamente eficientes y cuales generarían confort térmico al interior de los mismos. Información más detallada se puede ubicar en los manuales del programa.

### 2.3.1. Programa de simulación EnergyPlus

Energy Plus es un programa de análisis de energía y simulación de cargas térmicas. Se basa en una descripción del edificio por parte del usuario, desde la realización física, sistemas mecánicos asociados, etc. Energy Plus calcula las cargas de calentamiento y enfriamiento necesarios para mantener puntos establecidos de control térmico, condiciones asociadas a sistemas secundarios de HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning), cargas de enfriamiento y energía consumida por equipos primarios de planta (asociado a calentamiento o enfriamiento de agua para el funcionamiento de equipos), así como otros detalles que son necesarios a fin de verificar que las simulaciones se están realizando en la forma en que el edificio real lo haría (EnergyPlus, 2009).

### 2.3.1.1. Balance de energía de una zona térmica

El balance de energía para una zona térmica se muestra a continuación (EnergyPlus, 2009),

$$\dot{Q}_{\text{net}} = \dot{Q}_{\text{int}} + h \sum (\dot{V}_i (T_i - T_z)) + \sum (\dot{Q}_{\text{ext},i} - \dot{Q}_{\text{ext},o}) + \dot{Q}_{\text{ext},\text{sol}} - \dot{Q}_{\text{ext},\text{rad}} \quad (2.12)$$

donde:

- :  $\dot{Q}_{\text{net}}$  : potencia neta (W)
- :  $\dot{Q}_{\text{int}}$  : potencia interna (W)
- :  $\sum (\dot{V}_i (T_i - T_z))$  : potencia de transferencia por convección (W)
- :  $\sum (\dot{Q}_{\text{ext},i} - \dot{Q}_{\text{ext},o})$  : potencia de transferencia por radiación (W)
- :  $\dot{Q}_{\text{ext},\text{sol}}$  : potencia de radiación solar (W)
- :  $\dot{Q}_{\text{ext},\text{rad}}$  : potencia de radiación de la zona (W)
- :  $h$  : coeficiente de transferencia de calor (W/m<sup>2</sup>·K)
- :  $\dot{V}_i$  : flujo de aire (m<sup>3</sup>/s)
- :  $T_i$  : temperatura del aire (K)
- :  $T_z$  : temperatura de la zona (K)
- :  $\dot{Q}_{\text{ext},i}$  : potencia de radiación incidente (W)
- :  $\dot{Q}_{\text{ext},o}$  : potencia de radiación emitida (W)
- :  $\dot{Q}_{\text{ext},\text{sol}}$  : potencia de radiación solar (W)
- :  $\dot{Q}_{\text{ext},\text{rad}}$  : potencia de radiación de la zona (W)

Si se desprecia la capacitancia del aire la salida del sistema en estado estable deberá ser:

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dots + \dot{m}_n + h (T_{in} - T_{zone}) + \dot{m}_1 (T_{zone} - T_{out}) + \dot{m}_2 (T_{zone} - T_{out}) + \dots + \dot{m}_n (T_{zone} - T_{out}) \quad (2.13)$$

Los equipos proveen aire caliente o frío a las zonas para cumplir con las cargas térmicas de calentamiento o enfriamiento. La energía provista por el equipo a la zona,  $\dot{Q}_{HVAC}$ , puede por lo tanto ser formulado como la diferencia entre la entalpía del aire suministrado y la entalpía del aire que deja la zona, según la siguiente ecuación (EnergyPlus, 2009).

$$\dot{Q}_{HVAC} = \dot{m} h (T_{in} - T_{zone}) \quad (2.14)$$

donde

$T_{in}$ : temperatura del aire suministrado a la zona térmica por el equipo HVAC (K)

Esta ecuación asume que la suma de las tazas de flujo de aire suministrado a la zona es exactamente igual a la suma de las tazas de flujo de aire dejando la zona, a través de los ductos de retorno de aire del sistema y siendo expulsado directamente de la zona. El aire que deja la zona lo hace a la temperatura promedio del aire de la zona. El resultado de sustituir la ecuación (2.14) por  $\dot{Q}_{HVAC}$  en la ecuación de balance de energía (2.12) es mostrado en la siguiente ecuación (EnergyPlus, 2009).

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dots + \dot{m}_n + h (T_{in} - T_{zone}) + \dot{m}_1 (T_{zone} - T_{out}) + \dot{m}_2 (T_{zone} - T_{out}) + \dots + \dot{m}_n (T_{zone} - T_{out}) \quad (2.15)$$

Usualmente el término  $\dot{m}$  se puede aproximar mediante un término de diferencia finita como se muestra a continuación (EnergyPlus, 2009).

$$\dot{m} = \frac{m(t) - m(t - \Delta t)}{\Delta t} + \dot{m}_{in} \quad (2.16)$$

Esta aproximación (2.16) junto con la ecuación 2.15 puede ser usada para estimar la temperatura de la zona, no obstante esto limita severamente el tamaño de paso de tiempo bajo algunas condiciones. Para corregir esto se desarrollaron expresiones de más alto orden para el primer término derivativo con un correspondiente error de truncado más alto. La meta de esta aproximación fue permitir el uso de pasos de tiempo más grandes en la simulación usando la forma de Euler de primer orden, sin experimentar inestabilidades. Se trataron aproximaciones

desde el segundo hasta el quinto orden, con la conclusión que la aproximación de diferencia finita de tercer orden, mostrada a continuación, dio los mejores resultados (EnergyPlus, 2009).

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{1}{\Delta t} \left( T_5 - 3T_4 + 3T_3 - T_2 \right) \quad (2.17)$$

Cuando esta forma para la derivada es usada, la ecuación (2.15) cambia a:

$$\frac{1}{\Delta t} \left( T_5 - 3T_4 + 3T_3 - T_2 \right) = \frac{1}{\Delta t} \left( \sum \dot{Q}_{in} + \sum h(T_{in} - T) \right) + \frac{1}{\Delta t} \left( \sum \dot{Q}_{out} - \sum h(T - T_{out}) \right) \quad (2.18)$$

y la ecuación de actualización de la temperatura de la zona se convierte en:

$$T_5 = \frac{\sum \dot{Q}_{in} + \sum h(T_{in} - T) + \sum \dot{Q}_{out} + \sum h(T - T_{out})}{\frac{11}{6} + \sum \frac{h}{c_p V} \Delta t} + \frac{3}{2} T_4 - \frac{1}{3} T_3 \quad (2.19)$$

Esta es la forma usada en Energy Plus. Desde que las necesidades de calentamiento o enfriamiento (a través de los equipos HVAC) sobre la zona conducen el proceso completo, la cantidad de energía requerida para el acondicionamiento es usada como punto de partida para dimensionar la demanda de energía por parte de los equipos HVAC. Posteriormente una simulación del sistema provee la capacidad real de suministro y la temperatura de la zona es ajustada en caso sea necesario. Este proceso en Energy Plus se denomina el proceso Predicción/Corrección, cuyo esquema se resume a continuación, (EnergyPlus, 2009).

- Usando la ecuación (2.13), una estimación es hecha de la energía requerida del sistema (HVAC) para balancear la ecuación con la temperatura de la zona igual a la temperatura de setpoint.
- Con esa cantidad como demanda, el sistema es simulado para determinar su capacidad de suministro real en el tiempo de la simulación. Esto incluirá una simulación de planta si es necesario.
- La real capacidad del sistema es usada en la ecuación (2.19) para calcular la temperatura de la zona resultante.

### 2.3.1.2. Balance de energía en superficies exteriores

El balance de energía en la superficie exterior es:

$$q_{\text{sol}} + q_{\text{env}} + q_{\text{conv}} - q_{\text{cond}} = 0 \quad (2.20)$$

donde:

$q_{\text{sol}}$  :  $\dot{Q}_{\text{sol}} / A$  ( / )  
 ó  $\rho_{\text{sol}} \cdot I_{\text{sol}} \cdot \cos(\theta)$  ( / )

$q_{\text{env}}$  :  $\dot{Q}_{\text{env}} / A$  ( / )  
 ó  $\epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{amb}}^4 - T_{\text{surf}}^4)$  ( / )

$q_{\text{conv}}$  :  $\dot{Q}_{\text{conv}} / A$  ( / )

$q_{\text{cond}}$  :  $\dot{Q}_{\text{cond}} / A$  ( / )  
 ó  $U \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$  ( / )

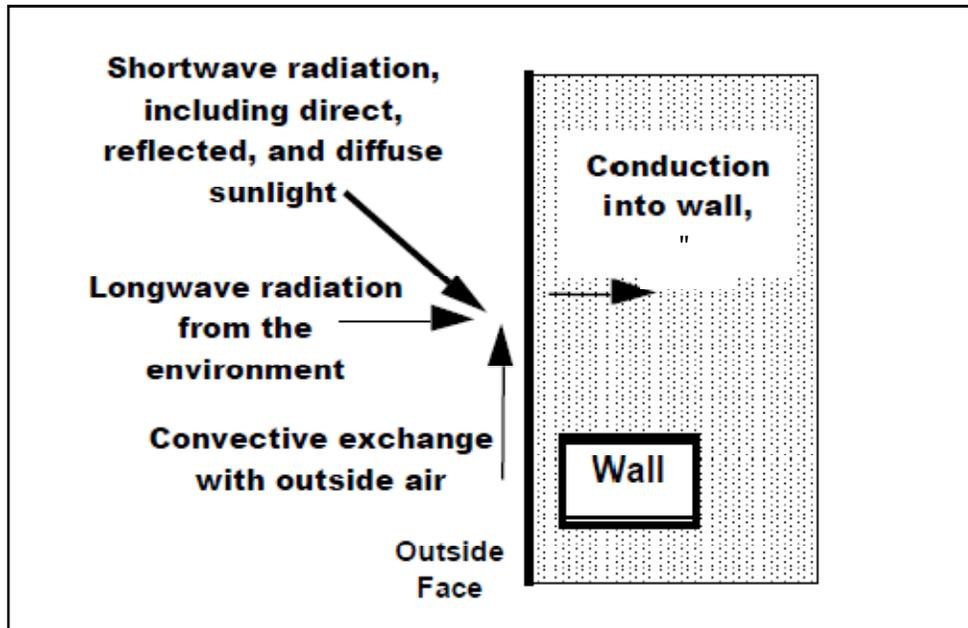


Figura 2.40. Diagrama del balance de energía exterior del volumen de control, (EnergyPlus, 2 009).

Todos los términos son positivos para un flujo de red hacia la cara, excepto el término de conducción, que tradicionalmente es tomado como positivo desde el lado exterior hacia el lado interior de la pared. Procedimientos simplificados generalmente combinan los tres primeros términos usando el concepto de temperatura sol-aire.

### 2.3.1.3. Balance de energía en superficies interiores

El corazón del método de balance de energía es el balance de energía interno que involucran las caras interiores de las superficies de la zona. Este balance de energía generalmente es modelado con cuatro componentes de transferencia de energía emparejados: 1) conducción a través de los elementos de los edificios, 2) convección al aire, 3) absorción y reflexión de radiación de onda corta y 4) intercambio radiante de onda larga. La radiación de onda corta incidente es proveniente de la radiación solar ingresando a la zona a través de ventanas y la emitida desde fuentes internas tales como luminarias. El intercambio de radiación de onda larga incluye la absorción y emisión de fuentes de radiación de baja temperatura, tales como todas las otras superficies de la zona, equipos y personas. El balance de energía en la superficie interna puede ser escrito como sigue:

$$q_{\text{con}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad,c}} + q_{\text{rad,l}} + q_{\text{int}} + q_{\text{ext}} = 0 \quad (2.21)$$

donde:

- " : ( / )
- " : ó ( / )
- " : ó ( / )
- " : ó é ( / )
- " : ó , ( / )
- " : ( / )

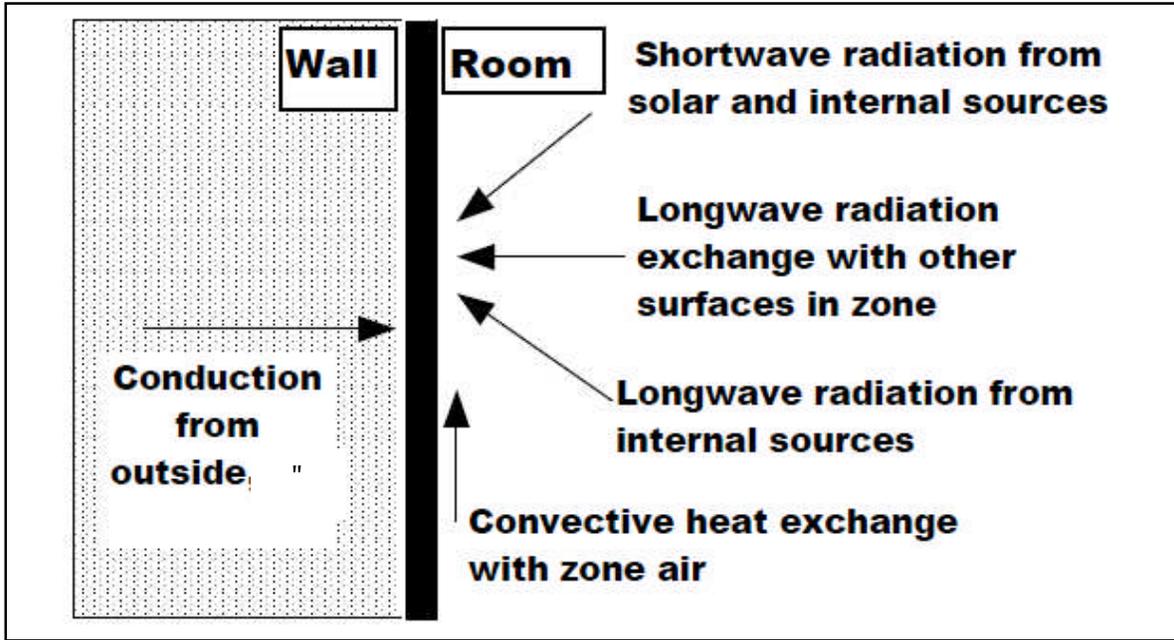


Figura 2.41. Diagrama del balance de energía interior del volumen de control, (EnergyPlus, 2 009).

#### 2.3.1.4. Conducción a través de paredes

##### 2.3.1.4.1. Funciones de transferencia por conducción

La solución más básica de series de tiempo es la ecuación de factor de respuesta, que relaciona el flujo en la superficie de un elemento, con una serie infinita de historiales de temperatura en ambos lados, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$q''(t) = \sum X_i T_i - \sum Y_i T_o, \quad (2.22)$$

donde  $q''$  es flujo de calor por conducción,  $T$  es temperatura,  $i$  significa el interior del elemento del edificio,  $o$  significa el exterior del elemento del edificio,  $t$  representa el paso de tiempo actual, y  $X$  e  $Y$  son los factores de respuesta.

Mientras en la mayoría de casos los términos en la serie decaen bastante rápido, el número infinito de términos necesarios para una solución de factores de respuesta exactos lo hacen poco deseable. Afortunadamente, la similitud de términos de alto orden puede ser usada para reemplazarlos con términos de un historial de flujos. La nueva solución contiene elementos que son llamados Funciones de Transferencia por Conducción (FTC). La forma básica de una solución de una función de transferencia por conducción es mostrada en la siguiente ecuación.

$$q''(t) = -Z_o T_o - \sum Z_i T_i + Y_o T_o + \sum Y_i T_i + \sum \Phi q''_i, \quad (2.23)$$

para el flujo de calor interior, y

$$q''(t) = -Y T_0 - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_j + X T_0 + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_j + \sum_{j=1}^{nz} \Phi_j q''_j, \quad (2.24)$$

para el flujo de calor exterior ( $q'' = q/A$ ), donde

$X$  : coeficiente exterior de la FTC,  $j = 0, 1, \dots, nz$ .

$Y$  : coeficiente compartido de la FTC,  $j = 0, 1, \dots, nz$ .

$Z$  : coeficiente interior de la FTC,  $j = 0, 1, \dots, nz$ .

$\Phi$  : coeficiente de flujo de la FTC,  $j = 0, 1, \dots, nz$ .

$T_0$  : temperatura de la superficie interior

$T_j$  : temperatura de la superficie exterior

$q''_0$  : flujo de calor por conducción sobre la cara exterior

$q''_j$  : flujo de calor por conducción sobre la cara interior

El subíndice seguido de la coma indica el periodo de tiempo para la cantidad, en términos del paso de tiempo  $\delta$ . Notar que los primeros términos de la serie (aquellos con subíndice 0) han sido separados del resto, en orden de facilitar el resolver la temperatura actual en el esquema de solución. Estas ecuaciones establecen que el flujo de calor en cada cara de la superficie de cualquier elemento del edificio está relacionado linealmente a la temperatura presente y algunas temperaturas previas en ambas superficies, interior y exterior, así como también a algunos de los valores previos de flujo en las superficies interior y exterior.

La forma final de la solución de la FTC revela porque es tan elegante y poderosa. Con una sola, relativamente simple, ecuación lineal con coeficientes constantes, la transferencia de calor por conducción a través de un elemento puede ser calculada. Los coeficientes (FTCs) en la ecuación son constantes que solo necesitan ser determinados una vez para cada tipo de construcción. Los únicos datos almacenados y requeridos son las FTCs en sí y un número limitado de valores de temperatura y flujos. La formulación es válida para cualquier tipo de superficie y no requiere el cálculo o almacenamiento de temperaturas interiores de los elementos. Mayores detalles del método usado para el cálculo de las funciones de transferencia se mencionan en los anexos (EnergyPlus, 2009).

### 3. MARCO METODOLÓGICO

Como se mencionó anteriormente, este trabajo perteneció a un proyecto de investigación realizado por el Centro de Energías Renovables de la UNI (CER-UNI) entre el 2 008 y el 2 010. El proyecto llevó el nombre de: “Propuesta técnica de confort térmico para viviendas ubicadas en comunidades entre los 3 000 y 5 000 m.s.n.m.” y este tema de tesis refleja una parte de los resultados obtenidos de la realización de dicho proyecto de investigación. A continuación se describe verbalmente las acciones llevadas a cabo para implementar la parte del proyecto que abarca la presente tesis.

#### 3.1. INICIO DE ACTIVIDADES Y SELECCIÓN DE COMUNIDAD

El proyecto de investigación inició formalmente el 25 de marzo del 2 008. En el periodo desde el inicio del proyecto hasta el 12 de junio del 2 008 se seleccionó una comunidad rural altoandina localizada en la región Ayacucho, en la provincia de Vilcashuamán (esto debido a que el CER-UNI ya había realizado anteriormente proyectos en la zona); una de las condiciones fue que el lugar seleccionado tenga un clima muy frío en comparación con las demás comunidades. Previamente, en el 2 007, el CER UNI ya había realizado mediciones de temperatura ambiente en 3 lugares de la provincia.

Luego de evaluar las condiciones climáticas registradas en los lugares, se seleccionó la comunidad de San Francisco de Raymina, ubicada en el distrito de Huambalpa, Vilcashuamán, Ayacucho (13° 45' 26" lat. sur; 73° 51' 26" long. Oeste; 3 700 msnm); por ser la que presentó las condiciones ambientales más hostiles (se registraron los mínimos de temperatura más bajos).

#### 3.2. DIAGNÓSTICO TÉRMICO

Una vez seleccionada la comunidad, se procedió a seleccionar una vivienda dentro de la comunidad. La vivienda seleccionada tenía que cumplir dos condiciones: ser una de las más descuidadas desde el punto de vista térmico (por ello más vulnerable a las condiciones de frío extremo) y que la familia que habitara dicha vivienda brindase facilidades para realizar mediciones al interior de la misma, sin que ello altere sus actividades cotidianas.

Luego de la selección de la vivienda se realizó un levantamiento de información, elaborándose planos, registrándose materiales constructivos y condiciones iniciales. Resultado de este levantamiento, se elaboró un plan de mediciones térmicas a realizarse al interior y exterior de la vivienda, esta información permitió elaborar un diagnóstico térmico posterior.

Desde el 12 de junio del 2 008 hasta el 20 de abril del 2 009 se monitorearon las condiciones al interior y exterior de la vivienda.

- Al exterior se registraron las condiciones meteorológicas de la comunidad, para ello se instaló una mini-estación meteorológica con sensores de rapidez y dirección de viento,

temperatura de bulbo seco, humedad relativa y radiación solar global. La estación meteorológica, de una capacidad de almacenamiento de 512Kb en memoria no volátil, permitió un monitoreo autónomo y una periódica descarga de datos que luego eran analizados en la PC.

- En la vivienda se instalaron 44 sensores de temperatura del tipo de resistencia variable, con un rango de medición entre -40 a 100 °C, estos sensores se utilizaron para medir temperaturas superficiales exteriores e interiores en: paredes, techos, suelos, etc.; además, se instalaron micro-estaciones meteorológicas para registrar temperatura de aire, humedad relativa y luminosidad en los ambientes interiores de la vivienda. Todas las mediciones fueron almacenadas en registradores portables con capacidad de almacenamiento de 32 520 mediciones en memoria no volátil.

Con la información registrada se realizó un diagnóstico térmico de la vivienda, calculándose flujos convectivos naturales de calor desde cada superficie al aire interior de cada ambiente, para ello se usaron las fórmulas empíricas mencionadas en el marco metodológico. También se calcularon los mínimos, máximos y promedios mensuales de temperatura, humedad relativa, etc. al interior y exterior de la vivienda.

### 3.3. VALIDACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN

A la vez que se realizaba el diagnóstico térmico de la vivienda, también se elaboró un modelo de simulación de la vivienda, usando el software de simulación térmica en edificios Energy Plus 3,0; para la elaboración de este modelo se recurrió a información registrada en la mini-estación meteorológica, así como a dimensiones y geometrías de la vivienda y a propiedades termofísicas de materiales obtenidos de la bibliografía.

Esta etapa permitió realizar una validación de nuestro modelo, al comparar las temperaturas registradas en la vivienda con las simuladas en el programa, asumiendo para ello infiltraciones de aire razonables. Todo esto permitió identificar el alcance y versatilidad del software para simular la realidad.

### 3.4. MODELACIÓN Y SELECCIÓN DE MODIFICACIONES CONSTRUCTIVAS

Una vez validado el modelo se procedió a simular modificaciones constructivas en la vivienda con la finalidad de lograr que los ambientes interiores sean más cálidos; para ello se hicieron “corridas” en el software de distintas configuraciones, seleccionándose finalmente una propuesta que permitía llegar a condiciones mínimas de confort en los meses invernales (de mayor frío).

### 3.5. MEDICIONES TÉRMICAS POSTERIORES A LA MODIFICACIÓN

Desde el 20 de abril al 20 de mayo del 2 009 se implementaron las modificaciones constructivas en la vivienda, completándose casi en su totalidad a fines de mayo. Una vez culminadas las

modificaciones se procedió a reinstalar los sensores de temperatura al interior de la vivienda, esto con la finalidad de registrar el efecto térmico de las modificaciones sobre la temperatura del aire en los ambientes interiores, justo en la época de invierno. Estas mediciones se realizaron desde el 20 de mayo del 2 009 y aún siguen realizándose.

Finalmente, se registró cuantitativamente el efecto de las modificaciones constructivas implementadas en la vivienda; comparando las temperaturas registradas en los ambientes interiores de la vivienda respecto a las registradas el año anterior (2 009 respecto a 2 008).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. INICIO DE ACTIVIDADES Y SELECCIÓN DE COMUNIDAD

La selección del lugar se realizó en base a un análisis de temperaturas registradas en el 2 007 en tres lugares de la provincia de Vilcashuamán, Ayacucho. Dichos lugares fueron: La comunidad de San José de Tía, la ciudad de Vilcashuamán y la comunidad de San Francisco de Raymina. En cada lugar se hicieron mediciones de temperatura al exterior e interior de una vivienda durante una noche, registrándose los siguientes valores.

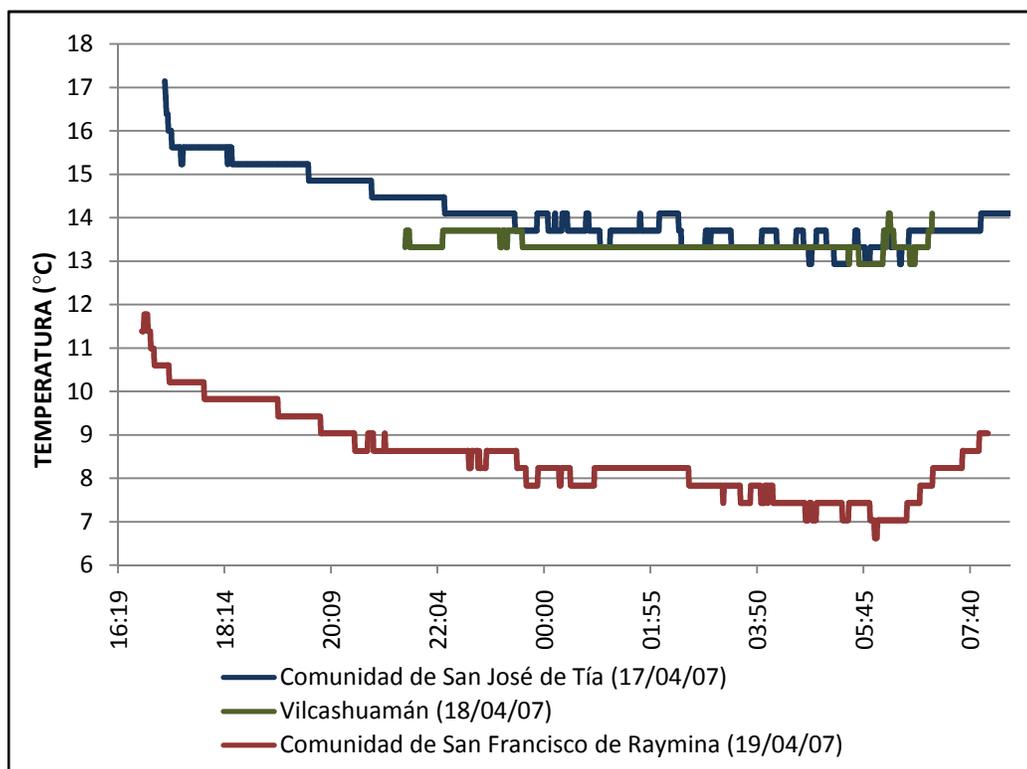


Figura 4.1. Temperaturas nocturnas registradas al interior de una vivienda de cada lugar.

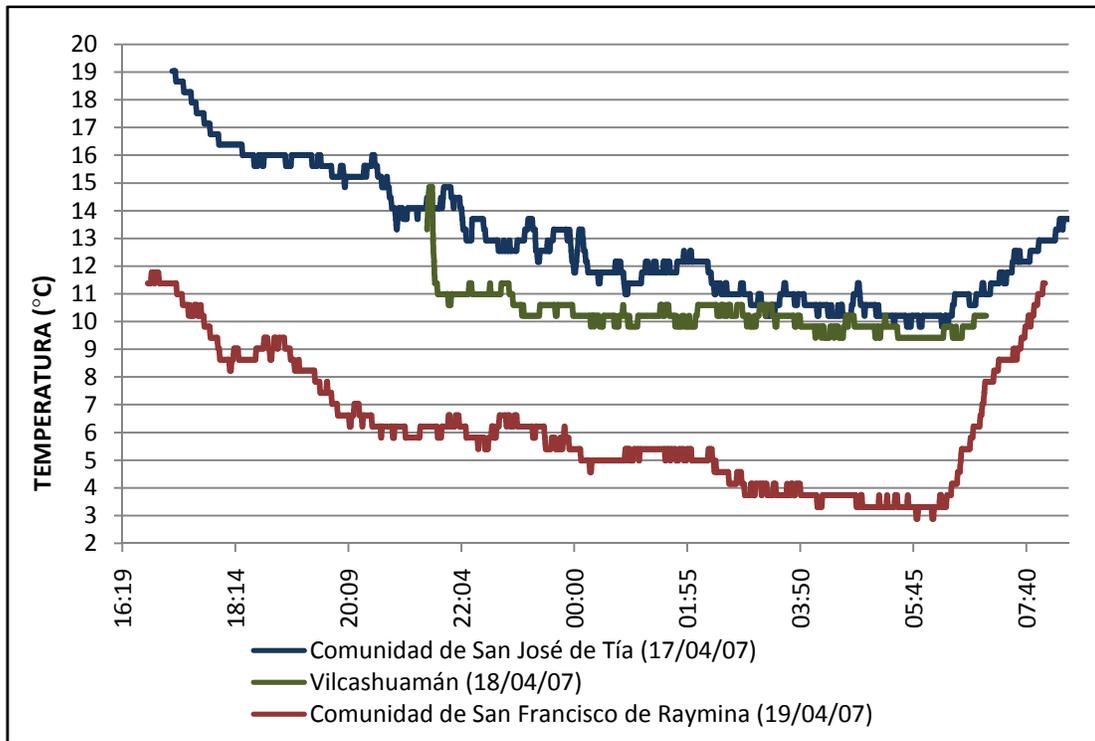


Figura 4.2. Temperaturas nocturnas exteriores registradas en cada lugar.



Figura 4.3. Vista panorámica de la comunidad de San Francisco de Raymina.



*Figura 4.4. Vista de las viviendas típicas de la comunidad de San Francisco de Raymina.*

#### 4.1.1. Observaciones y discusiones

De las gráficas anteriores se observa que es en la comunidad de San Francisco de Raymina donde se registraron las condiciones más hostiles; con temperaturas de aire al interior de una vivienda que llegaron a un mínimo de  $7^{\circ}\text{C}$  y temperaturas de aire exterior que llegaron a un mínimo de  $3^{\circ}\text{C}$  aproximadamente (en cada caso,  $6^{\circ}\text{C}$  por debajo de los mínimos registrados en los otros dos lugares).

- Si bien las mediciones en cada lugar no fueron simultáneas, la proximidad de los días (uno a continuación de otro) permite asumir con cierta confianza que los resultados de la comparación y las temperaturas registradas en dichos días son representativos de cada lugar.
- Se comparó los periodos nocturnos debido a que el interés de fondo es elevar las temperaturas nocturnas de la vivienda.

## 4.2. DIAGNÓSTICO TÉRMICO

### 4.2.1. Condiciones iniciales de la vivienda

La vivienda seleccionada presentó las siguientes características:

#### *De formas*

- La vivienda se ubica en la misma plaza de la comunidad, en la calle 10 Mz K lote 1. En dicha manzana se encuentran 10 viviendas.
- Las dimensiones del terreno son de 12m x 30m lo que da un área de 360 m<sup>2</sup>. El área se encuentra cercada por unos muros de adobe de aproximadamente un metro de altura.
- El área construida es de aproximadamente 65 m<sup>2</sup> en el cual se encuentran la casa que consta de 2 habitaciones y una sala comedor; junto a una de las habitaciones está la cocina y un pequeño almacén, ambas con su propio techo.
- En la parte frontal y posterior, la vivienda cuenta con dos ventanas de iguales dimensiones.

#### *De materiales*

##### *Muros*

- El material empleado es el adobe, este es fabricado de forma artesanal. Tiene como dimensiones 0,38m x 0,38m x 0,13m. Se aprecia un adobe bien elaborado, de contextura rígida que no se deforma con el tiempo. Entre adobe y adobe hay una capa de barro.

##### *Puertas y ventanas*

- La vivienda cuenta con 3 puertas, dos de madera y una de plancha de calamina metálica. Las de madera están ubicadas en la sala comedor de la vivienda y la de plancha metálica en la cocina, esta última sin su marco respectivo.
- Las dimensiones de la puerta de ingreso son de 1,00m x 2,15m. y comparte el frontis con dos ventanas de vidrio (1/16" de espesor) de marco metálico. Las dimensiones de cada ventana son de 1,04m x 1,00m.
- Los derrames (sellados) en marcos de puertas y ventanas no fueron bien realizados, ya que se observó espacios de aire entre vano y marco, dichos espacios o aberturas permitían el ingreso de aire frío a la vivienda.

##### *Techo*

- La mayor parte del techo de la vivienda fue de calamina metálica de espesor aproximado 1/32", este techo fue instalado debido a las carencias económicas de la familia. Sólo una habitación de la vivienda contaba con techo de tejas.

- La cocina, que es una construcción aparte, contaba con techo de tejas. El almacén tenía un techo de calamina metálica. Las tejas fueron de fabricación artesanal otras donadas por el ministerio de vivienda, ambas de poca dureza sufriendo fracturas por la caída de granizo u algún otro material.
- Tanto la cocina como la vivienda tienen un techo de 2 aguas, y una inclinación aproximada de 18° con respecto a la horizontal.
- Los derrames (sellados) en el encuentro entre paredes y techo no fueron bien realizados, ya que se observó espacios de aire en estos encuentros, dichos espacios o aberturas permitían el ingreso de aire frío a la vivienda.

Una condición inicial adicional observada en la vivienda fue el fogón (cocina rural en la cual se quema leña) ubicado en el ambiente de la cocina, el cual estaba en pésimas condiciones y se convertía en una fuente de humo intenso cada vez que se cocinaba. **En el anexo se muestran los planos de la vivienda en su estado inicial.**



*Figura 4.5. Arriba, vista frontal: ingreso a la sala. Centro; izquierda: ingreso al patio de servicio, derecha: patio e ingresos a la cocina y a la sala. Abajo: vista posterior (ventana de los dormitorios).*



*Figura 4.6. Arriba, izquierda: rendijas en el techo por donde se filtra el aire, derecha: rendijas en el vano de la puerta. Abajo: fogón típico usado que genera problemas de humo y de uso.*

En la sección Anexos se adjunta los planos de la vivienda en sus condiciones iniciales.

#### 4.2.2. Mediciones experimentales

A continuación se muestran los resultados de las mediciones realizadas al exterior e interior de la vivienda. Debido a la gran cantidad de información se ha optado por mostrar las mediciones hechas en los meses de junio, julio, agosto y septiembre del 2008, los cuales cubren la estación invernal.

#### 4.2.2.1. Condiciones climáticas exteriores

A continuación se muestran las condiciones climáticas exteriores registradas en la comunidad.

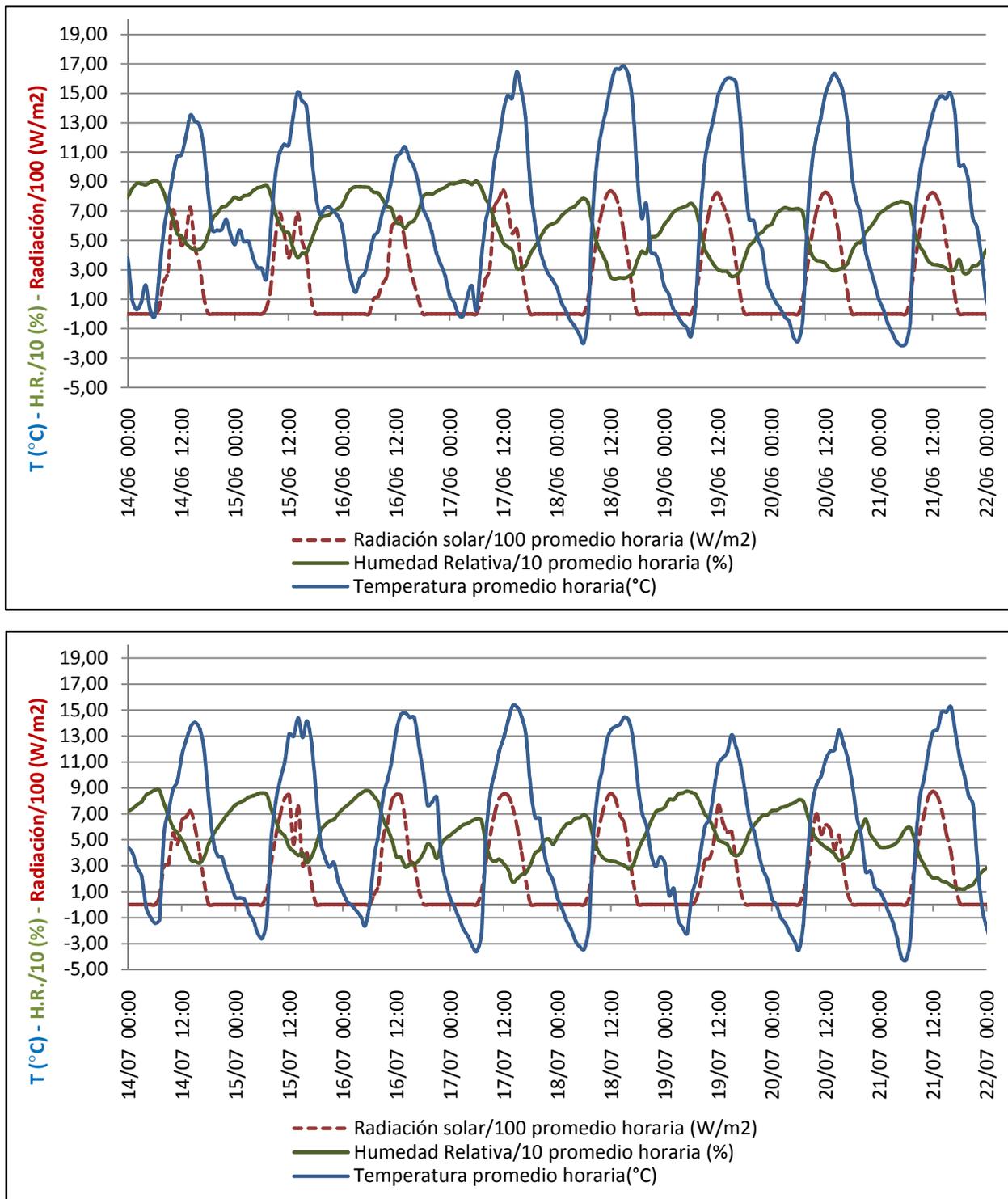


Figura 4.7. Condiciones climáticas exteriores registradas en junio y julio del 2008 en la comunidad de San Francisco de Raymina.

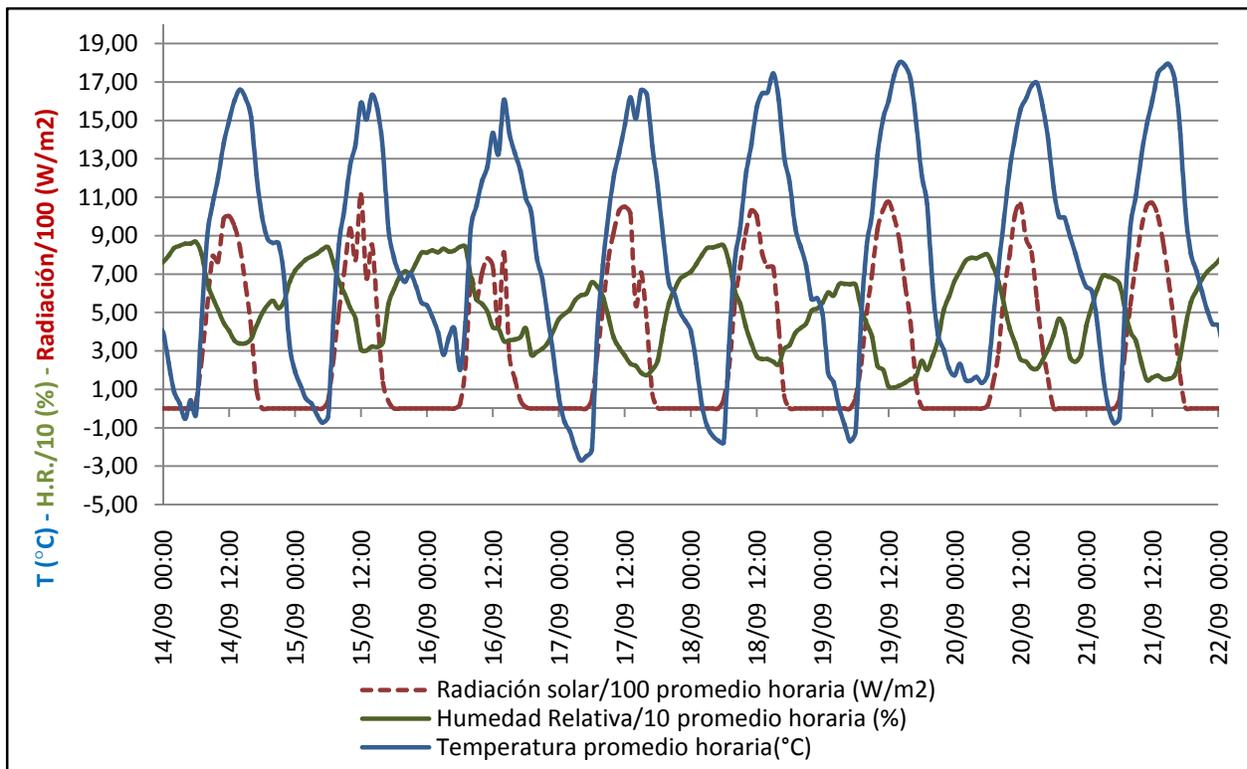
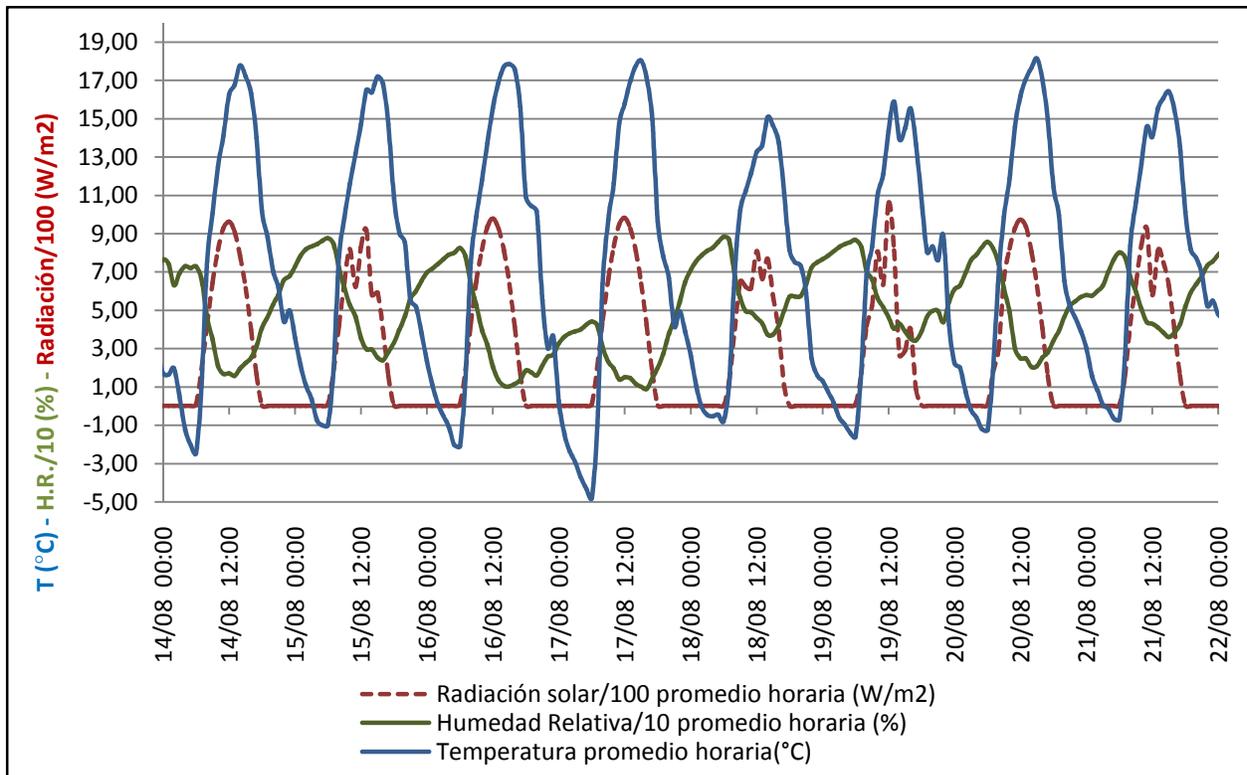


Figura 4.8. Condiciones climáticas exteriores registradas en agosto y septiembre del 2008 en la comunidad de San Francisco de Raymina.

Tabla 4.1. Condiciones climáticas exteriores promedio mensuales en el 2008, registradas en la comunidad de San Francisco de Raymina.

Mes	T promedio Mensual [°C]	T mínima promedio Mensual [°C]	T máxima promedio Mensual [°C]	H.R. promedio Mensual [%]	H.R. mínima promedio Mensual [%]	H.R. máxima promedio Mensual [%]	Irradiación diaria promedio Mensual [kW-h/(m <sup>2</sup> .día)]	Velocidad de viento promedio mensual [m/s]
Junio	6,5	-1,7	15,8	60,7	32,1	84,5	5,2	1,1
Julio	5,8	-3,1	15,7	56,4	28,1	82,9	5,4	1,1
Agosto	7,3	-1,7	17,3	53,3	24,6	83,3	5,9	1,2
Septiembre	8,2	-0,4	18,0	55,6	25,4	84,4	6,4	1,4

#### 4.2.2.1.1. Observaciones y discusiones

En las gráficas se observa que el pico de radiación solar incidente se da aproximadamente a medio día, sin embargo los máximos de temperatura se dan 2 o 3 horas después (entre las 2 a 3 p.m. aproximadamente), esto es debido a que quien realmente da la energía para que el aire se caliente es el suelo, a través de un flujo de calor por convección natural; por ello, probablemente este flujo de calor llega a su máximo a las 3 p.m. cuando el suelo ya se ha calentado y está a una temperatura máxima debido a la radiación solar incidente.

En las gráficas se observa que en los momentos del día en que la temperatura del aire exterior es máxima (2 a 3 p.m. aproximadamente), la H.R. del aire es mínima y durante la noche sucede lo inverso (3 a.m. aproximadamente). Esto tiene su explicación de la siguiente forma: el aire almacena cierta cantidad de vapor de agua, durante el día al calentarse el aire este se expande haciendo que un mayor volumen de aire contenga la misma cantidad de vapor de agua (HR disminuye), durante la noche el aire se enfría contrayéndose y haciendo que un menor volumen de aire contenga cierta cantidad de vapor de agua (H.R. aumenta).

En promedio, durante los días en los meses invernales la temperatura mínima del aire exterior es de -2°C y la temperatura máxima es de 17°C, teniéndose una amplitud de 19°C. Durante estos meses la irradiación solar diaria es muy constante siendo su valor en promedio de 5,5 kW-h/(m<sup>2</sup>-día).

Se observa que es en el mes de julio donde se dan las temperaturas mínimas promedio más hostiles (-3,1°C), “mejorando” las condiciones desde el mes de septiembre.

#### 4.2.2.2. Condiciones térmicas interiores

Como se mencionó en las secciones anteriores, al interior de la vivienda se instalaron sensores de temperatura para registrar las condiciones térmicas de sus ambientes y componentes. Para esto se elaboró un plan de mediciones y un plano de ubicación de sensores, los cuales se muestran a continuación.

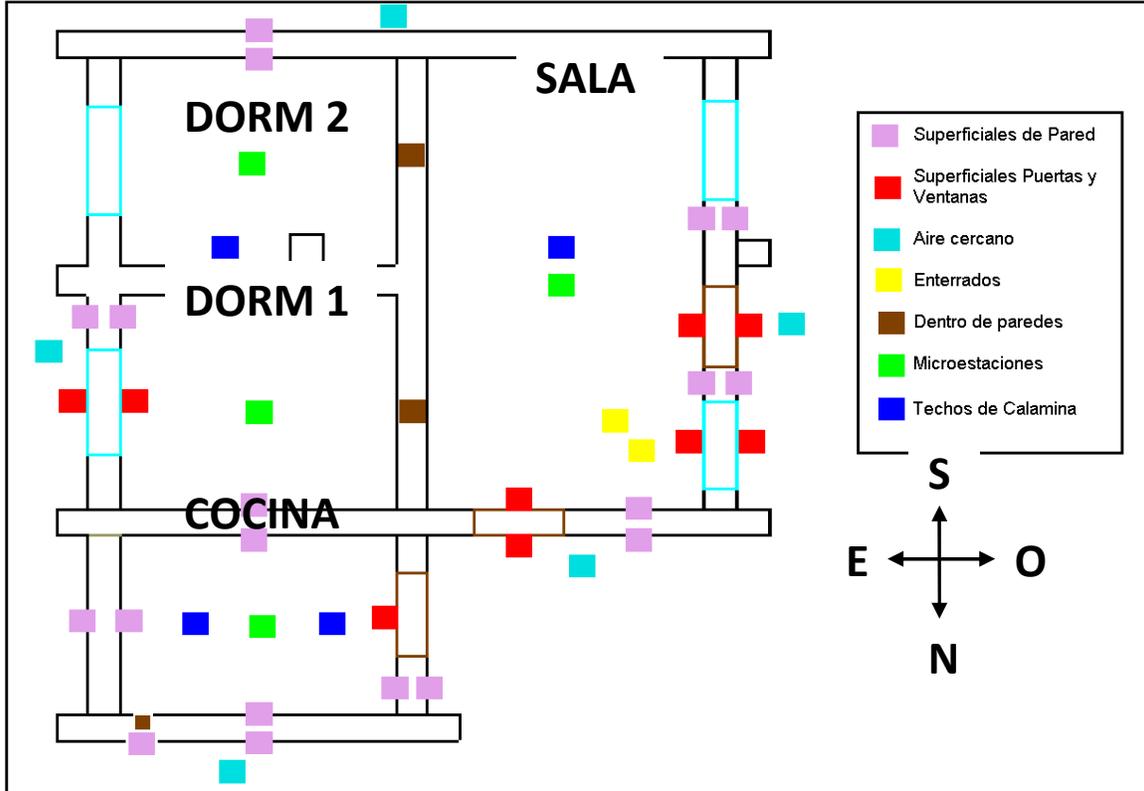


Figura 4.9. Diagrama de la disposición de sensores instalados en la vivienda seleccionada

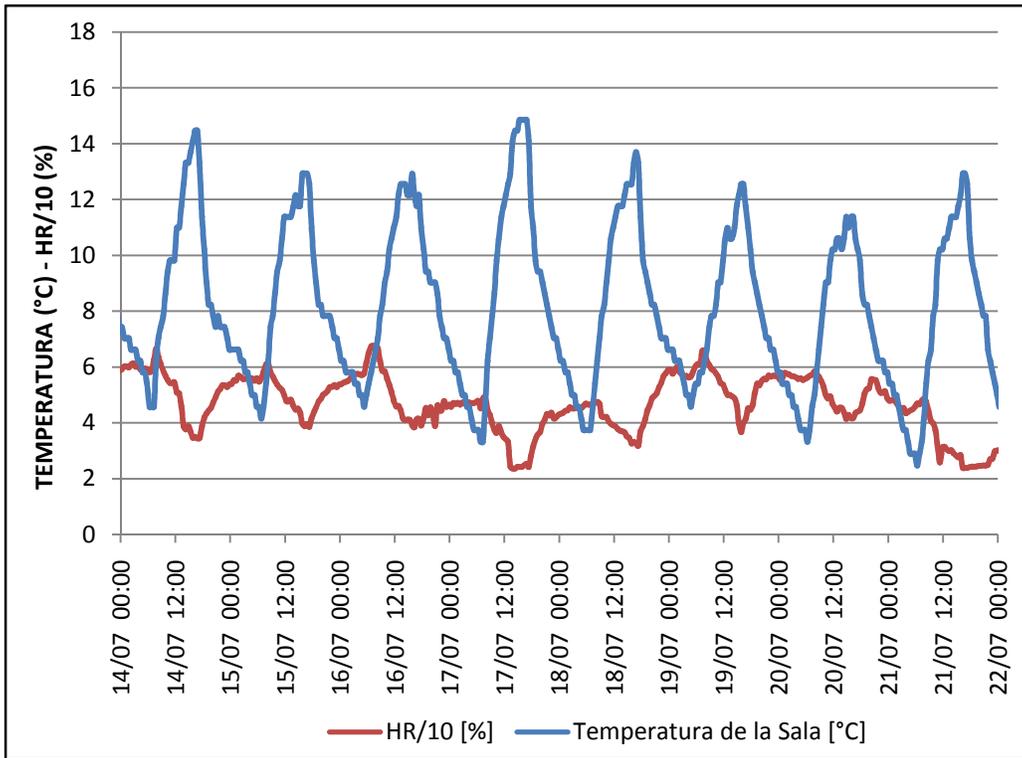
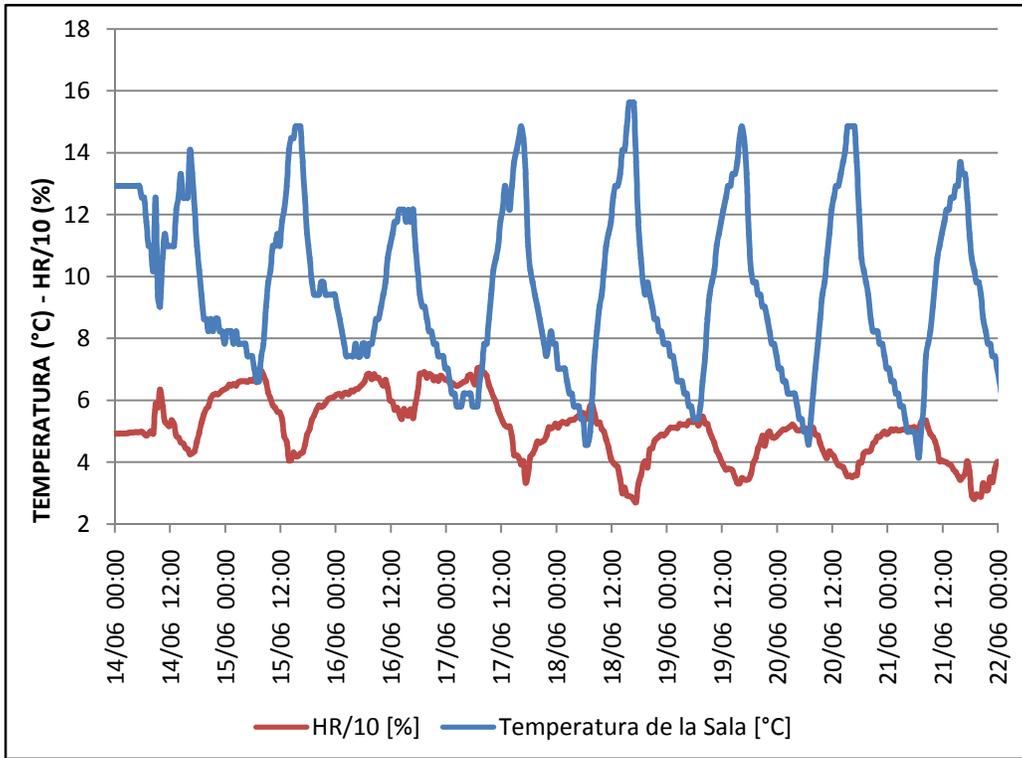


Figura 4.10. Temperaturas y humedades relativas del aire en la sala de la vivienda para los meses de junio y julio del 2008.

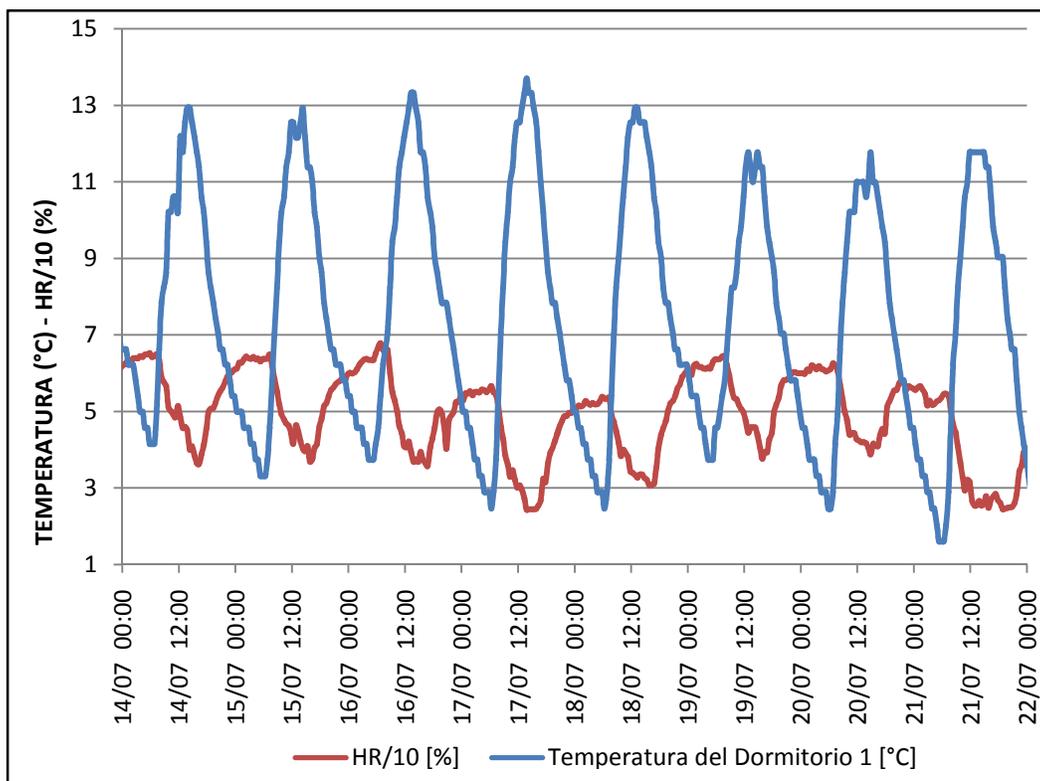
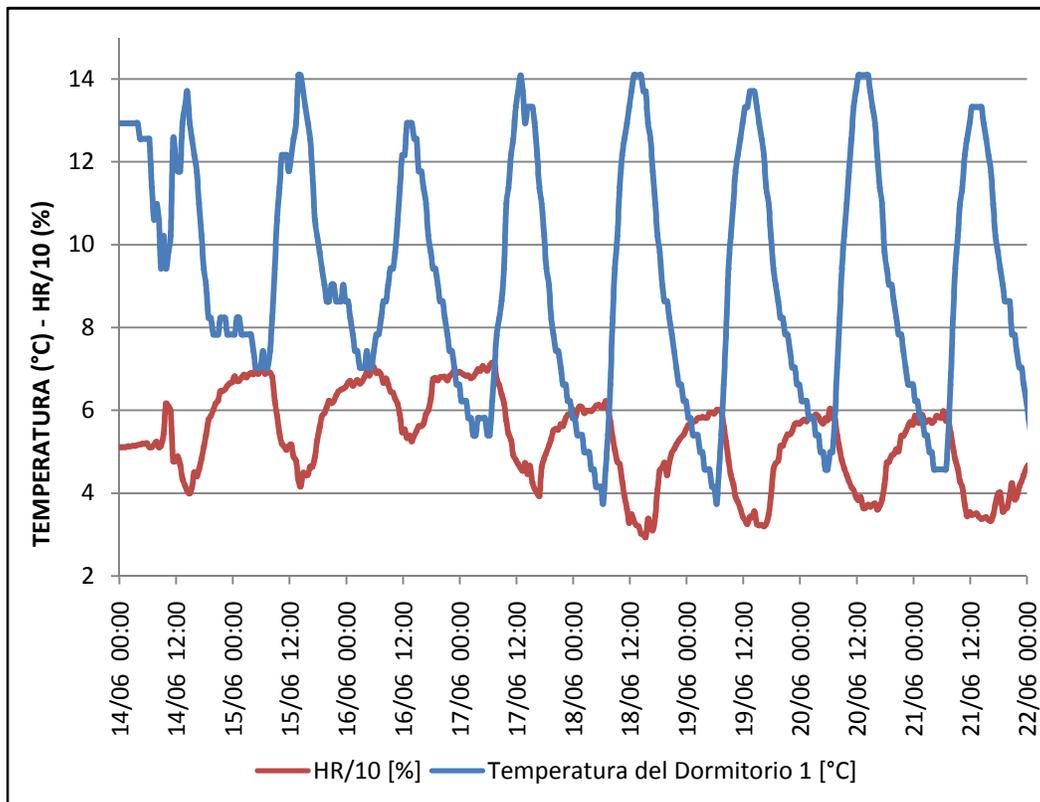


Figura 4.11. Temperaturas y humedad relativa del aire en el dormitorio 1 de la vivienda para los meses de junio y julio del 2008.

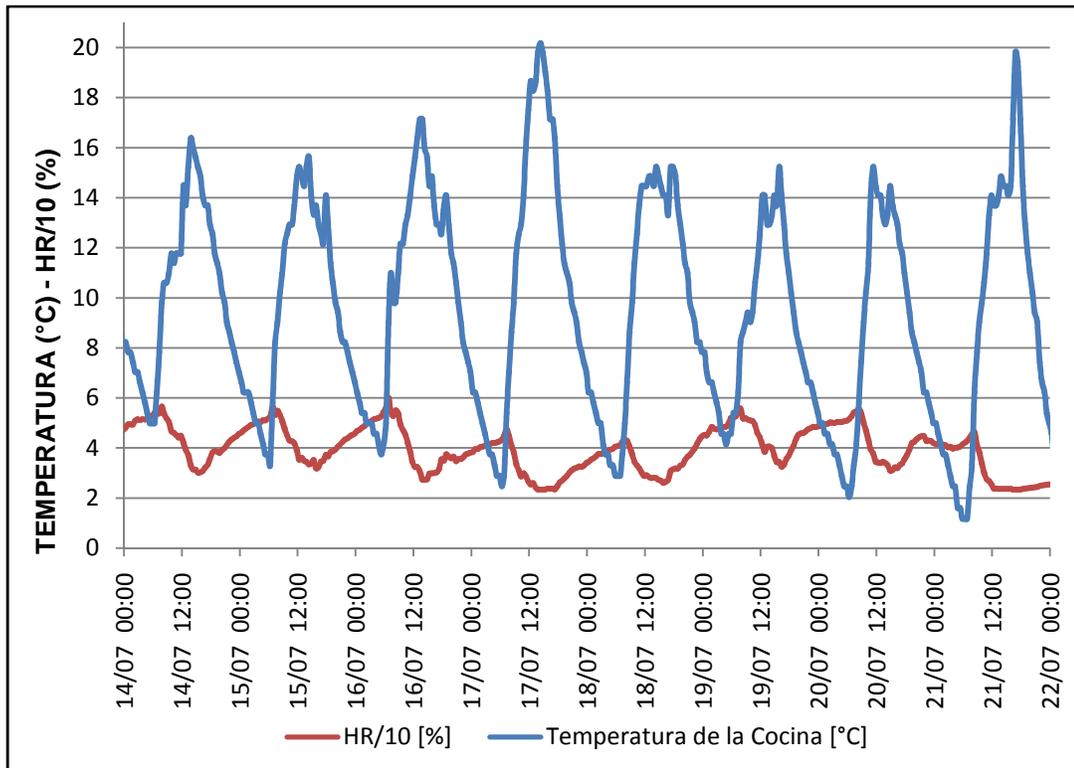
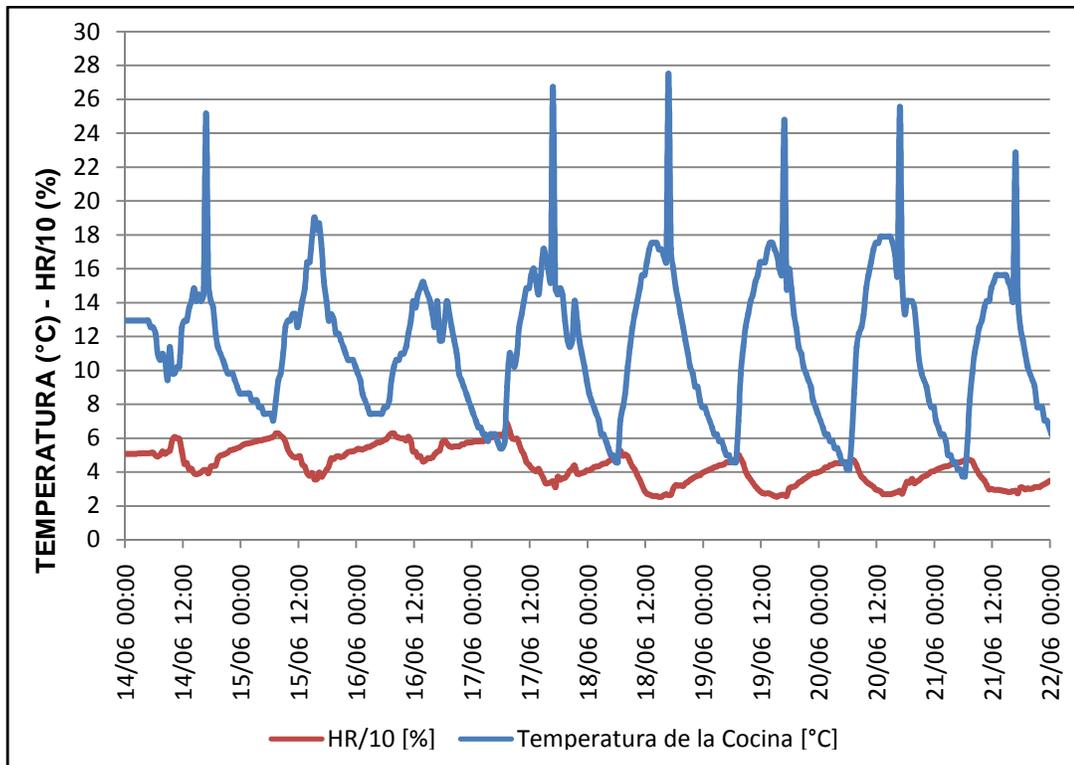


Figura 4.12. Temperaturas y humedad relativa del aire en la cocina de la vivienda para los meses de junio y julio del 2008.

Tabla 4.2. Condiciones termo-higrométricas interiores promedio mensuales en el 2008, registradas en la vivienda seleccionada de la comunidad de San Francisco de Raymina.

Mes	Temperatura promedio mensual de la Sala [°C]	Temperatura máxima promedio mensual de la Sala [°C]	Temperatura mínima promedio mensual de la Sala [°C]	H.R. promedio mensual de la Sala [°C]	H.R. máxima promedio mensual de la Sala [°C]	H.R. mínima promedio mensual de la Sala [°C]
Junio	9,2	14,1	5,4	52,2	62,8	38,5
Julio	8,3	13,7	3,9	48,0	60,0	33,6
Agosto	9,7	15,3	5,4	44,9	58,8	30,6
Septiembre	11,1	16,6	6,8	44,7	60,3	28,7

Mes	Temperatura promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]	Temperatura máxima promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]	Temperatura mínima promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]	HR promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]	HR máxima promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]	HR mínima promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]
Junio	8,8	13,3	5,0	54,5	66,0	39,5
Julio	7,6	12,8	3,1	50,5	62,8	34,4
Agosto	9,4	14,7	4,8	45,9	59,6	30,9
Septiembre	11,4	16,8	6,9	45,1	59,4	29,4

Mes	Temperatura promedio mensual de la Cocina [°C]	Temperatura máxima promedio mensual de la Cocina [°C]	Temperatura mínima promedio mensual de la Cocina [°C]	HR promedio mensual de la Cocina [°C]	HR máxima promedio mensual de la Cocina [°C]	HR mínima promedio mensual de la Cocina [°C]
Junio	10,7	20,5	5,1	44,9	56,4	33,1
Julio	9,6	17,1	3,1	40,9	53,9	28,9
Agosto	11,1	18,8	4,7	39,7	53,5	28,2
Septiembre	13,2	20,7	6,9	38,1	54,3	25,4

#### 4.2.2.2.1. OBSERVACIONES Y DISCUSIONES

Las temperaturas mínimas promedio mensuales de los ambientes interiores siempre están por debajo de los 5°C. Las temperaturas máximas promedio mensuales son de 14°C aproximadamente, dando esto una amplitud térmica de 9°C.

En el interior de la vivienda se observa que la H.R. del aire tiene sus mínimos en las horas en que la temperatura de los ambientes interiores tiene sus máximos (3 a 5 p.m. dependiendo del ambiente) y viceversa. Cabe mencionar que los mínimos de temperatura del aire en los ambientes interiores se dan aproximadamente a las 7 a.m., esto implica que desde la media noche hasta las 7 a.m. las personas tienen que dormir en ambientes similares a una congeladora, que van desde una temperatura de 6°C hasta 3°C.

En la cocina las temperaturas máximas promedio están alrededor de los 19°C, esto debido al efecto radiante de la fuente de calor que es el fogón; no obstante, las temperaturas mínimas promedio son similares a los otros ambientes (menores a 5°C) evidenciándose un fuerte problema de infiltraciones de aire.

De las tablas se observa que es el mes de julio en el cual se dan las condiciones más críticas dentro de la vivienda (mínimos promedio de 3°C), “mejorando” un poco las condiciones desde el mes de septiembre (mínimos promedio de 7°C) .

### 4.2.2.3. FLUJOS CONVECTIVOS

Se calculó el flujo de calor convectivo natural desde cada superficie interior hacia el aire de los ambientes interiores, para ello se usaron las temperaturas medidas en paredes, suelo, ventanas, puerta, aire, la geometría asociada a cada superficie y las fórmulas empíricas de la bibliografía. A continuación se muestran algunas de las temperaturas superficiales registradas.

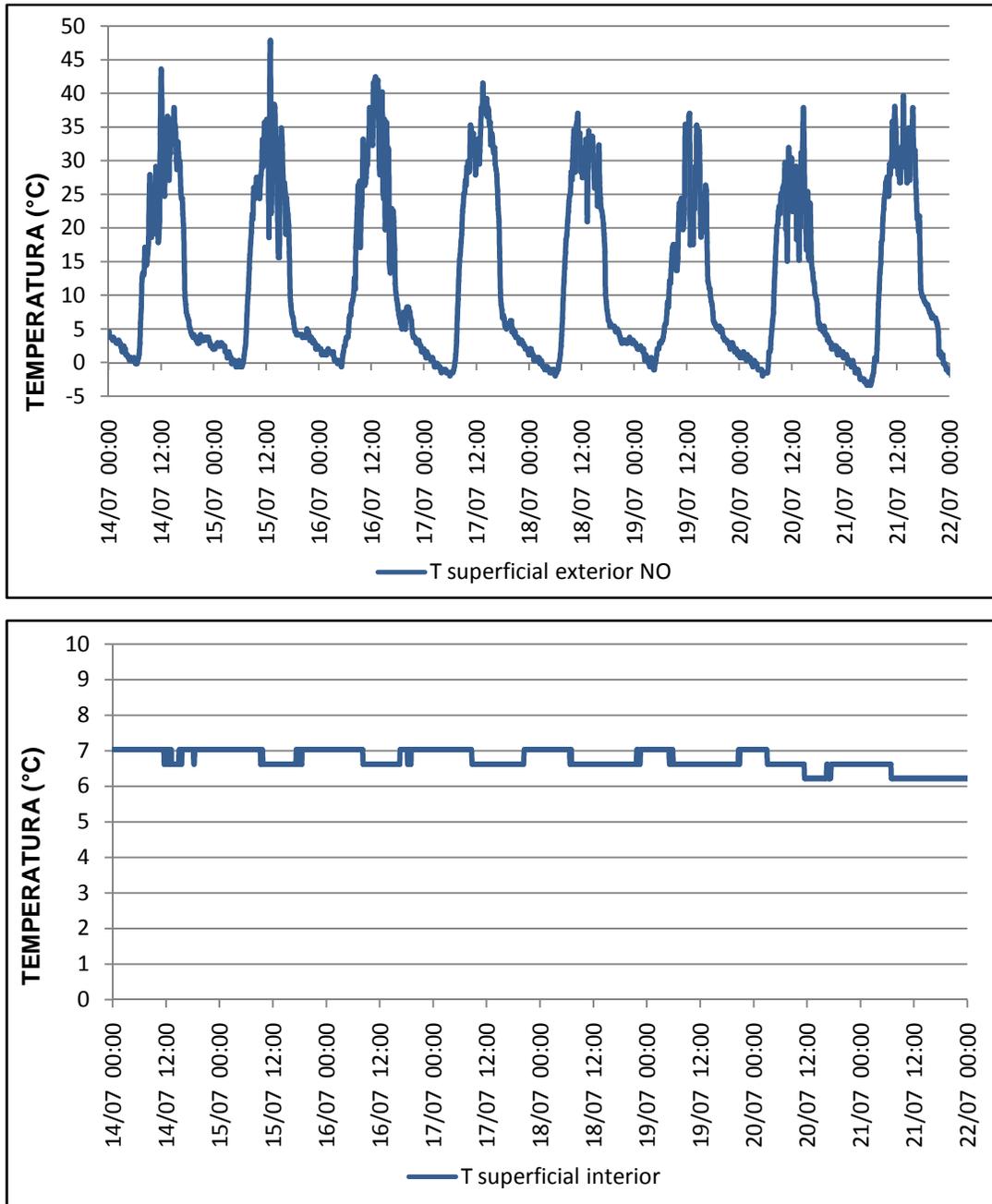


Figura 4.13. Temperaturas superficiales interiores en elementos de la vivienda. Arriba: temperatura del techo de calamina metálica de la sala. Abajo: temperatura del piso de tierra apisonada de la sala. Valores medidos en julio del 2008.

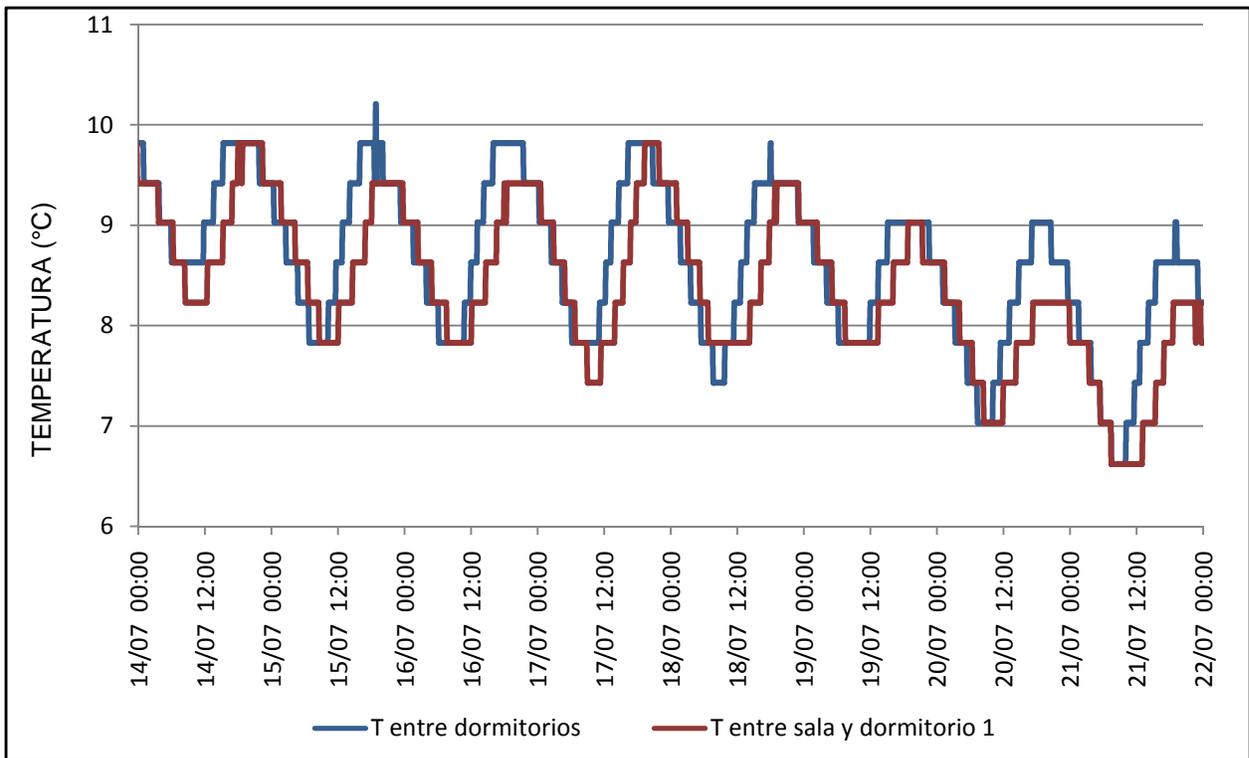
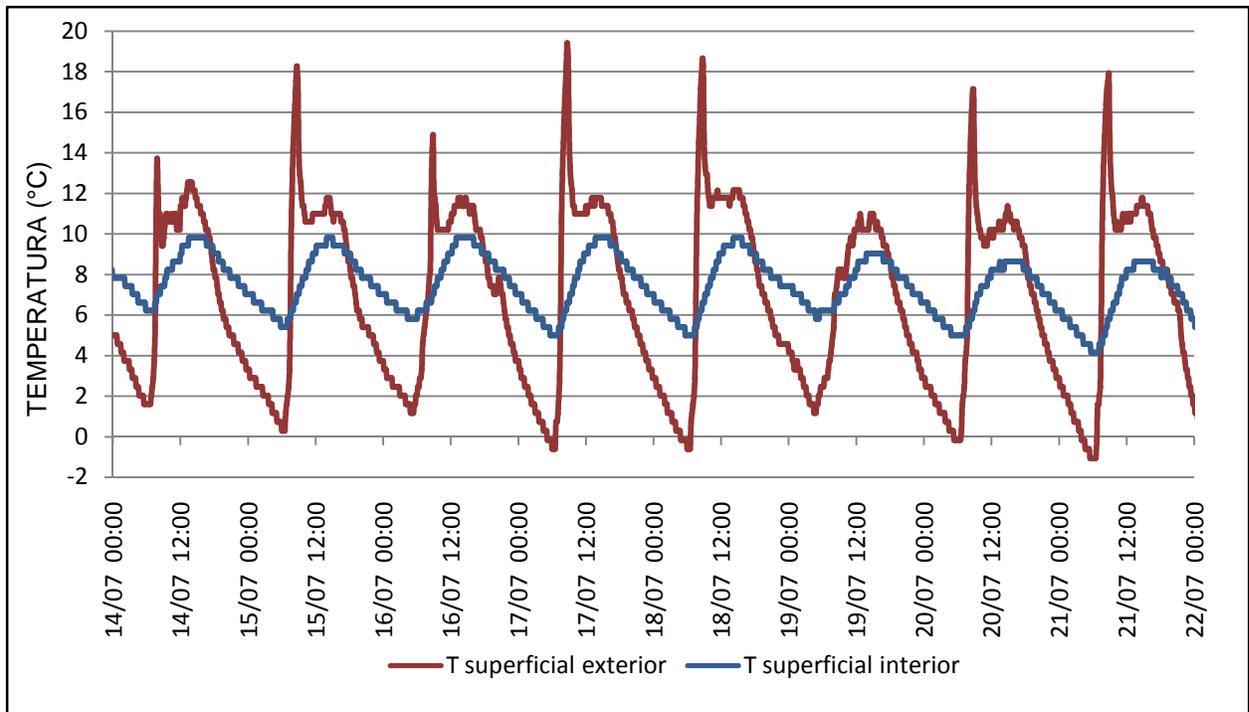


Figura 4.14. Temperaturas superficiales interiores y exteriores en elementos de la vivienda. Arriba: temperatura de la pared este de la vivienda (perteneciente a los dormitorios). Abajo: temperatura interior de los muros divisores de ambientes; azul: muro entre dormitorios, rojo: muro entre sala y dormitorio 1.

Se muestran los flujos de calor convectivo natural calculados, desde la superficie de cada elemento constructivo hacia el aire de la zona interior; en este caso para la zona de la sala.

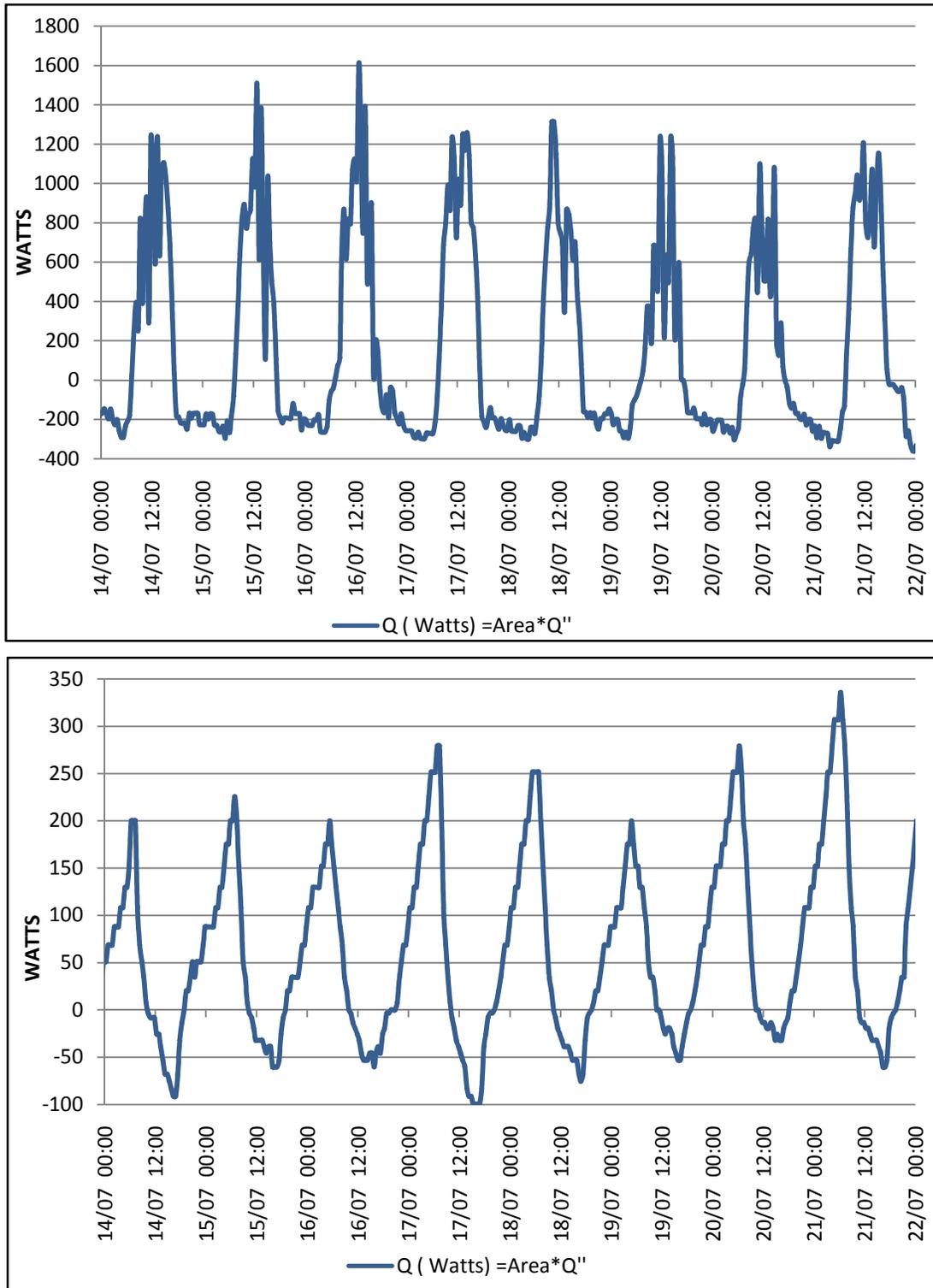


Figura 4.15. Flujos de calor convectivo natural desde las superficies interiores hacia el aire de la sala. Arriba: para el techo de calamina metálica. Abajo: para el suelo de tierra apisonada.

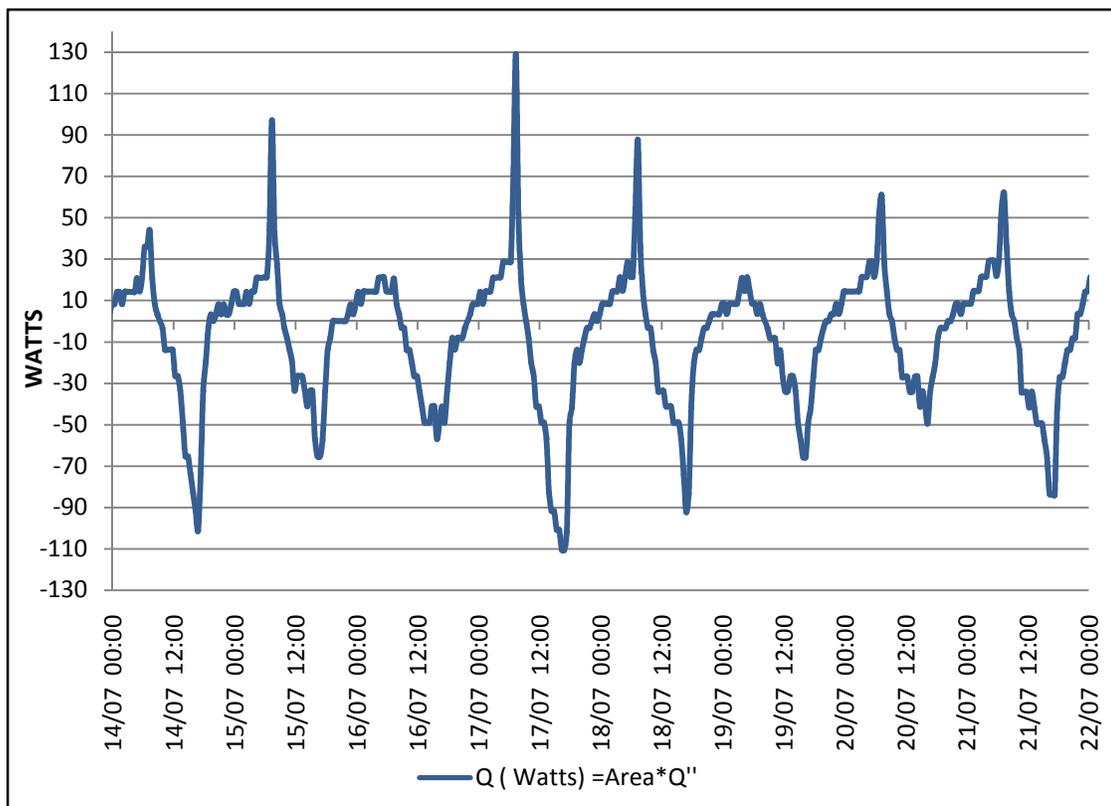
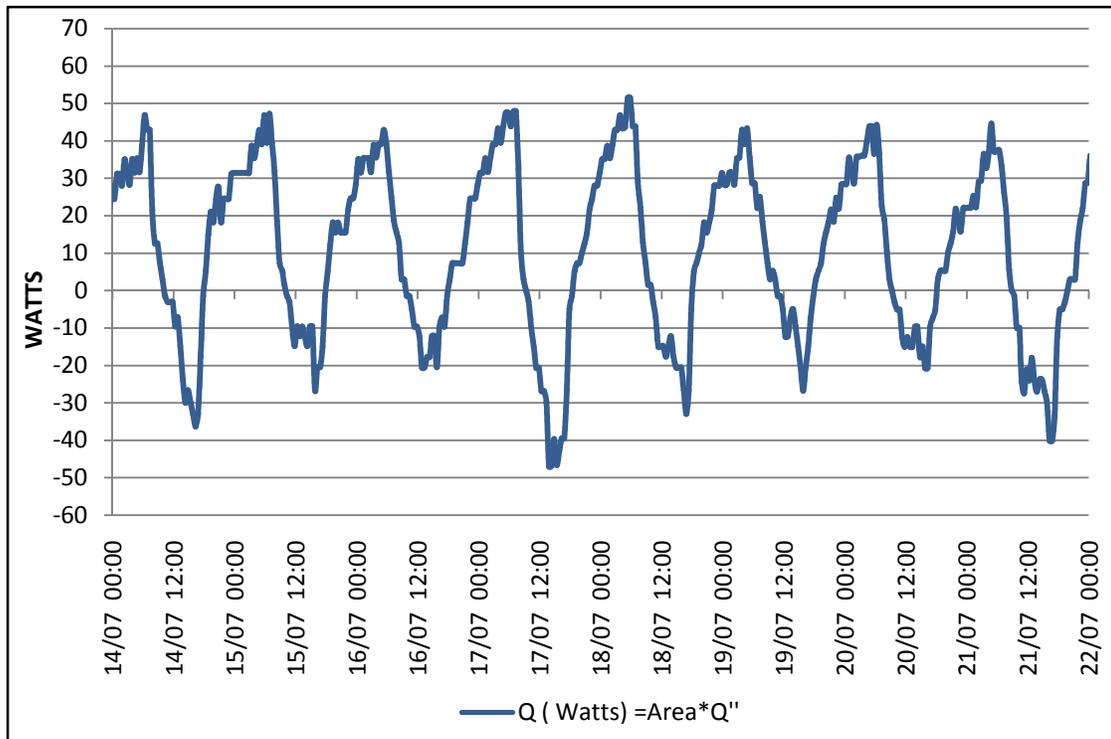


Figura 4.16. Flujos de calor convectivo natural desde las superficies interiores hacia el aire de la sala. Arriba: para la pared Oeste de adobe. Abajo: para la pared Sur de adobe.

Tabla 4.3. Energía total diaria promedio por convección natural que recibe el aire de la Sala, asociado a cada elemento constructivo que define el espacio. Valores para el mes de Julio.

Mes	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por el Techo de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por el Suelo de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Puerta Norte de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Puerta Oeste de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Ventana Nor Oeste de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Ventana Sur Oeste de la Sala [W.h]
Julio	4393,8	1373,3	68,8	354,9	88,7	88,7

Mes	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Pared Norte de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Pared NO de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Pared SO de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Pared Sur de la Sala [W.h]	Energía total diaria promedio mensual que entra al ambiente por la Pared Interior Sala-Dormitorio de la Sala [W.h]	ENERGÍA TOTAL DIARIA PROMEDIO MENSUAL QUE ENTRA AL AMBIENTE DE LA SALA [W.h]
Julio	79,0	93,1	143,8	-253,4	15,8	<b>6446,6</b>

#### 4.2.2.3.1. Observaciones y discusiones

Se observa que las temperaturas de un techo de calamina metálica pueden llegar a máximos superiores a 40°C y a mínimos menores a 0°C.

Se observa que el suelo permanece a una temperatura muy estable en todo momento, en promedio 7°C.

Se observa que para los muros exteriores de adobe (que definen la envolvente de la vivienda), la diferencia entre las temperaturas superficiales interiores y exteriores puede llegar a valores de 5°C durante las noches; siendo la temperatura superficial exterior en algunos casos menor a 0°C. La oscilación de la temperatura superficial interior de estos muros va desde los 6°C hasta los 10°C.

Las temperaturas de los muros interiores de adobe (divisores de ambientes) oscilan entre los 8 y 10°C.

Se observa que durante el día, el flujo de calor por convección natural asociado al techo de calamina metálica brinda una gran ganancia al aire de la sala (llegándose a picos de 1 500 W); no obstante, durante las noches la calamina metálica se enfría tanto que genera una pérdida de calor del orden de los 300 W. Pese a ello, el techo en promedio brinda una ganancia de calor diaria de 4,393 kW.h.

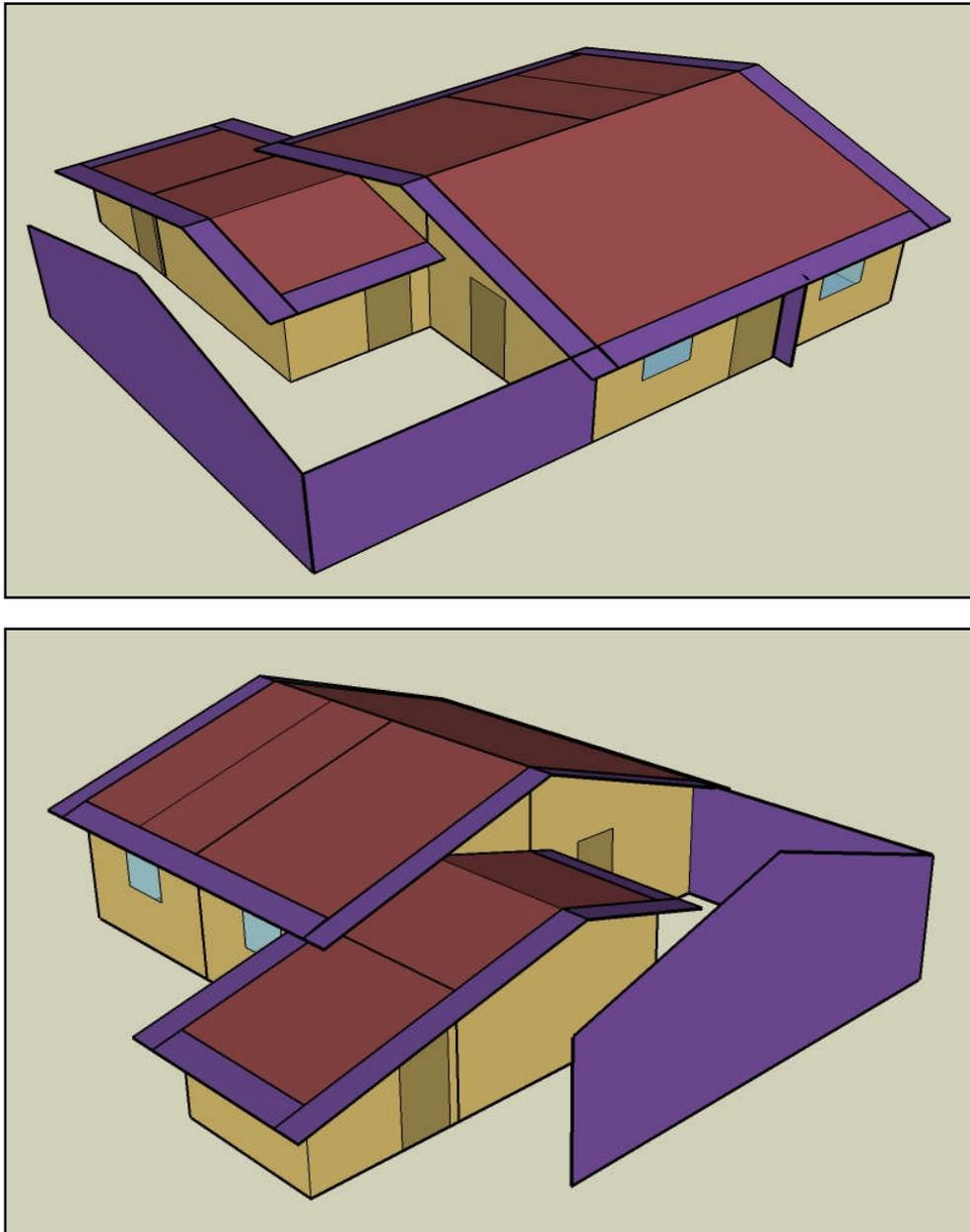
Se observa que el suelo actúa como una fuente de calor, ya que la energía diaria por convección natural dada por el suelo (de tierra apisonada) es de 1,373 kW.h en promedio. La explicación de esto es que el aire de la sala está en gran parte del día a temperaturas menores que la del suelo (7°C), esto genera que el suelo se convierta en una fuente de calor; no obstante, puesto que el objetivo es elevar la temperatura de los ambientes por encima de 10°C, el suelo siempre se convertirá en un sumidero de calor por lo que es necesario aislarlo térmicamente.

Los muros no tienen un efecto tan marcado como el techo y el suelo. En la sala se observa que la pared oeste brinda en promedio una energía diaria de 236,9 W.h. El muro sur, el cual es el menos favorecido por su orientación (la radiación solar directa no llega a incidir en este muro), se convierte en un sumidero de calor, siendo la pérdida diaria de energía de 253,4 W.h en promedio.

Al realizar los cálculos de los flujos de calor por convección natural asociados a cada superficie para el mes de julio, se obtiene que en promedio el aire de la sala gana 6,446 kW.h al día; sin embargo toda esta energía se pierde por las infiltraciones de aire exterior (renovaciones de aire) según se explica en una sección del marco teórico. El gran problema de infiltraciones de aire exterior genera que los ambientes interiores sean muy fríos (llegando a mínimos de 3°C), siendo de vital importancia solucionar este problema a fin de elevar la temperatura de los ambientes interiores.

### 4.3. VALIDACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN

Una vez realizado el diagnóstico térmico se procedió a elaborar un modelo de la vivienda original en el software de simulación térmica en edificios Energy Plus 3,0; para ello se usó información registrada en la mini-estación meteorológica, propiedades termofísicas de los materiales que conformaban muros, techos, etc. (datos obtenidos de la bibliografía) y la geometría de la vivienda (obtenido de los planos).



*Figura 4.17. Vistas del modelo de la vivienda seleccionada en la comunidad de San Francisco de Raymina generadas en el entorno gráfico Google SketchUp.*

A continuación se muestran las curvas de temperatura simuladas para el dormitorio1 usando el modelo elaborado en el Energy Plus. A este proceso se le denominó “validación del modelo”, ya que se definieron valores de infiltración de aire con la finalidad de que la temperatura simulada coincidiera con las temperaturas medidas en el 2008.

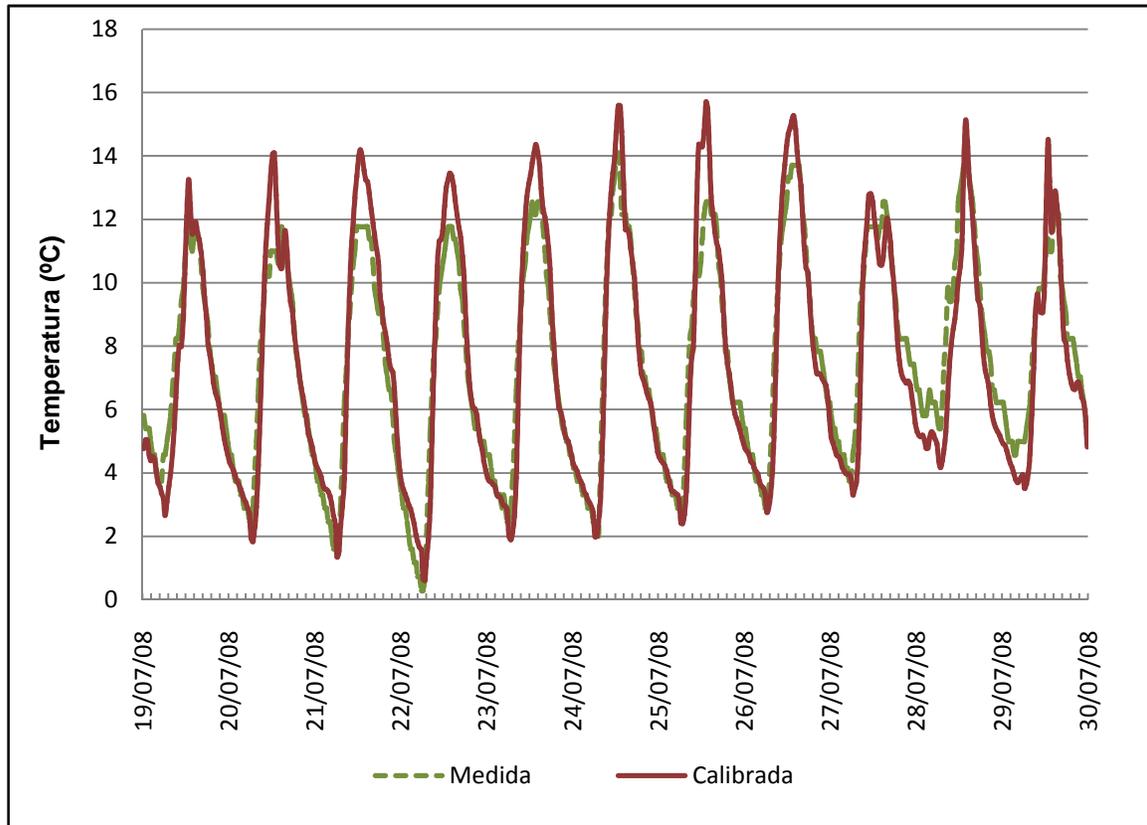


Figura 4.18. Comparación entre valores medidos en el 2008 y simulados (calibrados) con el programa Energy Plus para las temperaturas del aire en el dormitorio 1 de la vivienda.

A continuación se muestran las infiltraciones de aire simuladas para los ambientes de la vivienda en el modelo elaborado en el Energy Plus.

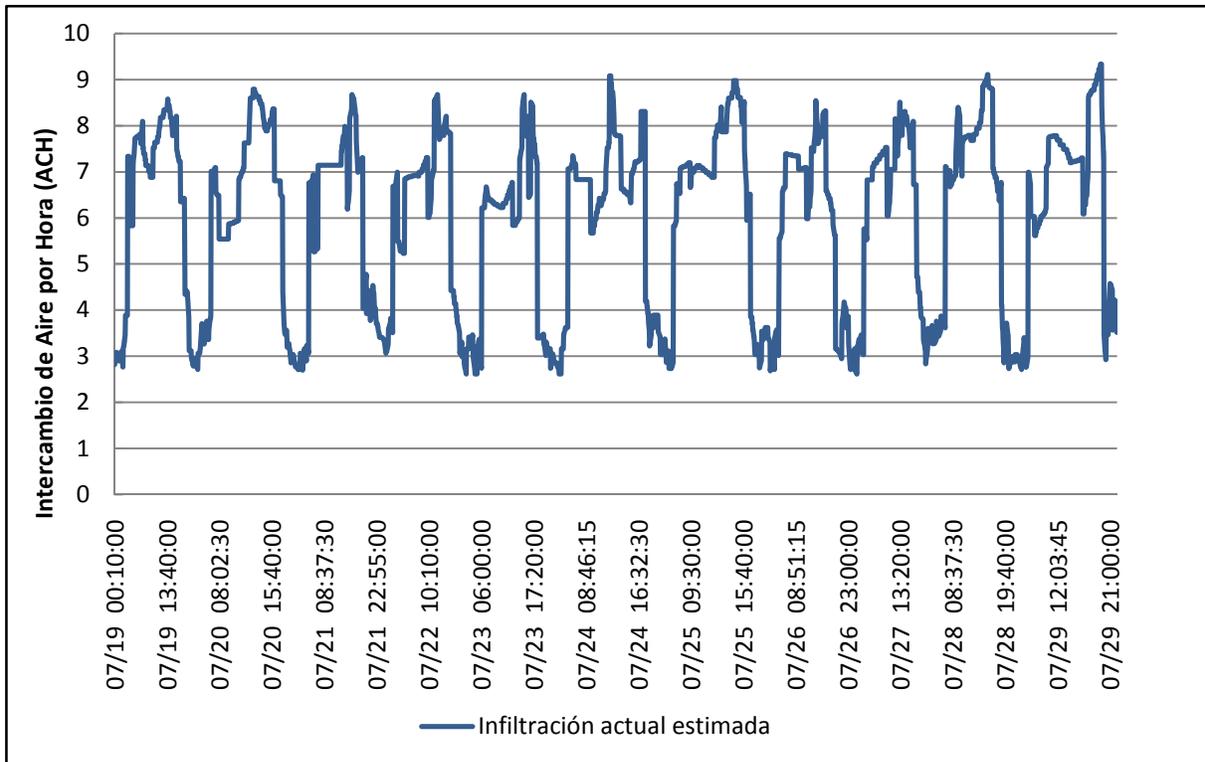


Figura 4.19. Intercambios de Aire por Hora simulados para los ambientes de la vivienda en el modelo de simulación.

#### 4.3.1. Observaciones y discusiones

Se observa que los valores de temperatura simulados para el dormitorio 1 coinciden en gran medida con los valores registrados en el 2 008; para darse esta coincidencia el modelo de simulación establece que los intercambios de aire entre los ambientes de la vivienda y el exterior deben de estar en el orden de 6 a 8 ACH durante el día y 3 ACH durante las noches. Estos valores de infiltración de aire son razonables considerando el gran problema de agujeros y espacios en encuentros entre techo y paredes, deficientes sellados en marcos de ventanas, etc.

## 4.4. MODELACIÓN Y SELECCIÓN DE MODIFICACIONES CONSTRUCTIVAS

### 4.4.1. Opciones de modificación constructiva

Dentro de las posibles modificaciones constructivas para la vivienda y consideraciones en la modelación usando el Energy Plus, se tuvo:

#### *Aislamiento térmico del techo*

Con la finalidad de aislar térmicamente el techo se consideró la siguiente configuración tipo sándwich: calamina metálica (0,5 mm) – paja o ichu (4cm) – planchas de fibrocemento (0,4 cm).

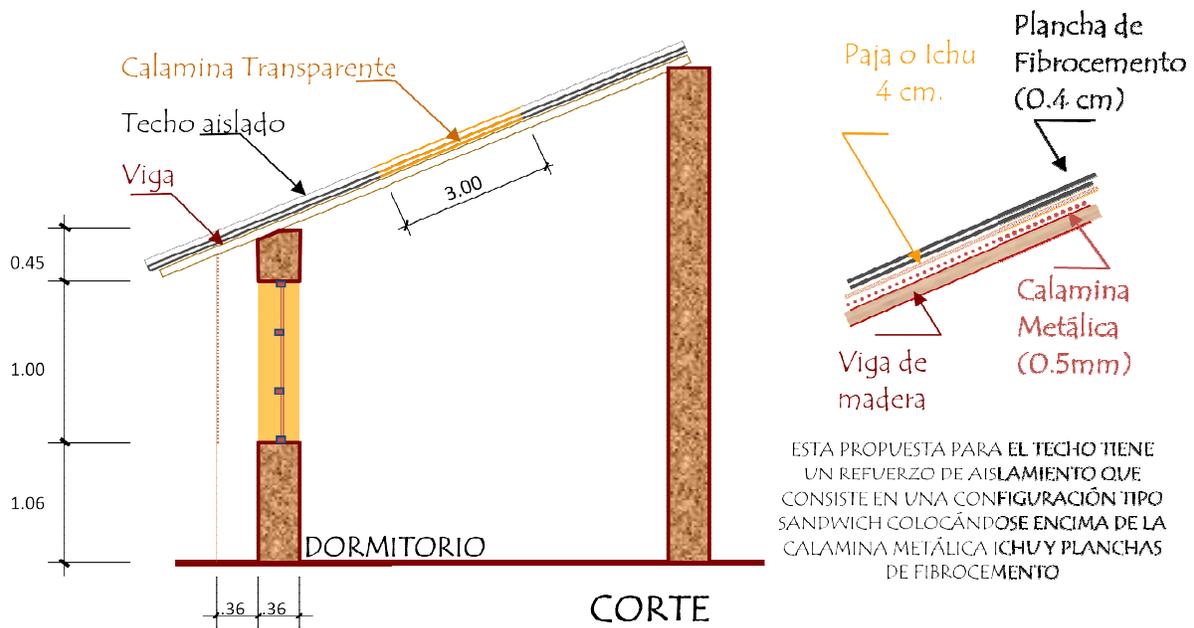
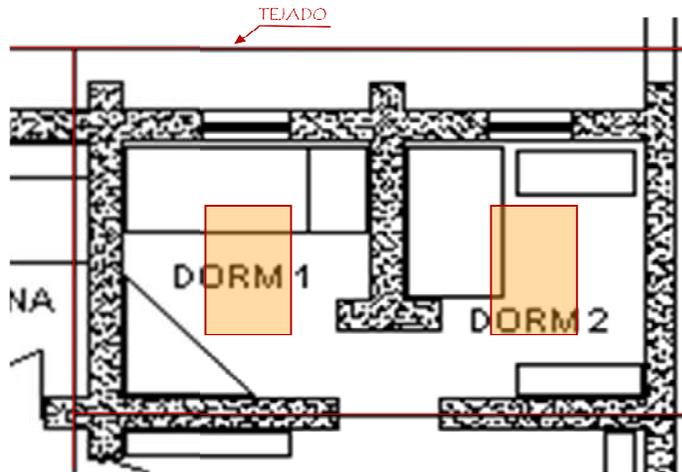


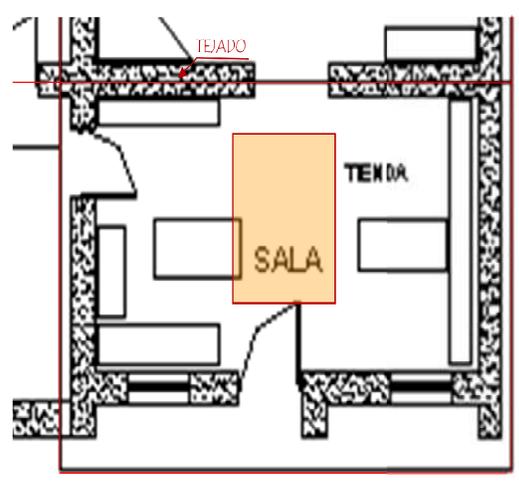
Figura 4.20. Detalle del aislamiento térmico propuesto para el techo. Se plantea el uso de la calamina metálica como soporte del colchón de aislamiento.

#### *Claraboyas translúcidas en el techo*

Se consideró la colocación de claraboyas ubicadas en el techo, usando para ello planchas translúcidas de policarbonato de 1,75 mm de espesor. El área de estas claraboyas fue aproximadamente el 25% del área total del techo, siendo en cada dormitorio de 1,2m x 3,0 m y en la sala de 2,5m x 3,0m. Esta opción permite la captación directa de la radiación solar.



PLANTA  
 POSICIÓN DE LAS CALAMINAS TRANSLÚCIDAS DE POLICARBONATO EN EL TECHO PARA EL INGRESO DE LUZ NATURAL. (1.20 x 3.00m)



PLANTA  
 POSICIÓN DE LA CALAMINA TRANSLÚCIDAS DE POLICARBONATO EN EL TECHO PARA EL INGRESO DE LUZ NATURAL (2.50 x 3.00m)

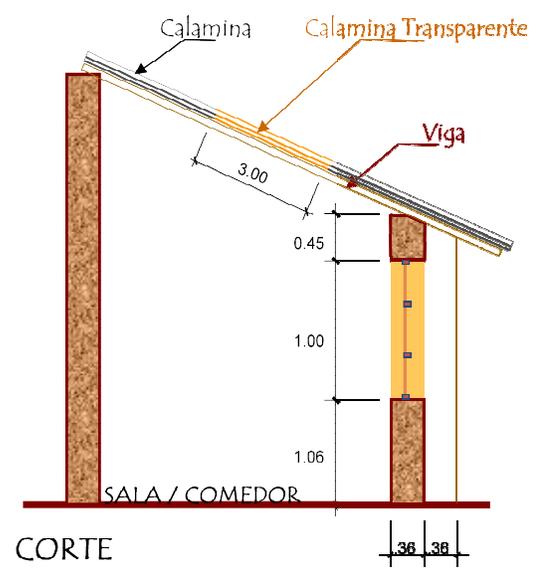


Figura 4.21. Ubicación de las claraboyas translúcidas en los distintos ambientes de la vivienda. Para la simulación se consideraron las dimensiones mencionadas arriba.

**Piso aislado térmicamente**

Se consideró un aislamiento térmico para el piso con la siguiente configuración tipo sándwich: sobre la tierra apisonada una cama de piedras (15 cm) – espacio de aire (7 cm) – madera machihembrada (2cm); las piedras evitan que la humedad del suelo “suba” y esté en contacto con la persona, el espacio de aire funciona como el elemento de aislamiento térmico.

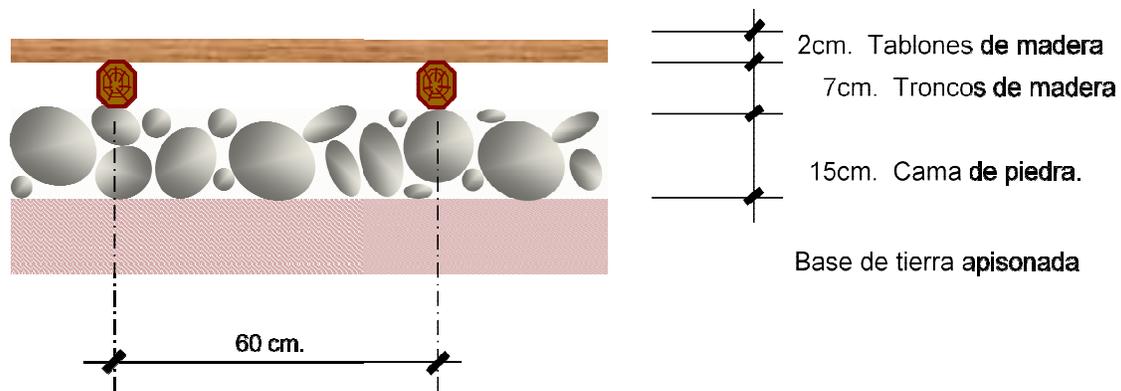


Figura 4.22. Detalle del aislamiento térmico propuesto para el piso. El piso de madera machihembrada se sostiene sobre listones o troncos de madera de 7 cm de espesor.

### ***Invernaderos adosados a ambientes de la vivienda***

Se consideró la colocación de invernaderos adosados a muros de algunos ambientes de la vivienda (dormitorios y sala) a fin de que sean una fuente de calor y una protección contra los vientos fríos; además, el aire caliente en los invernaderos podría ingresar a los dormitorios a través de ductos de intercambio (aberturas) habilitadas en los muros. La estructura de los invernaderos fue de madera y la cubierta de polietileno con protección especial anti UV (plástico de invernadero).

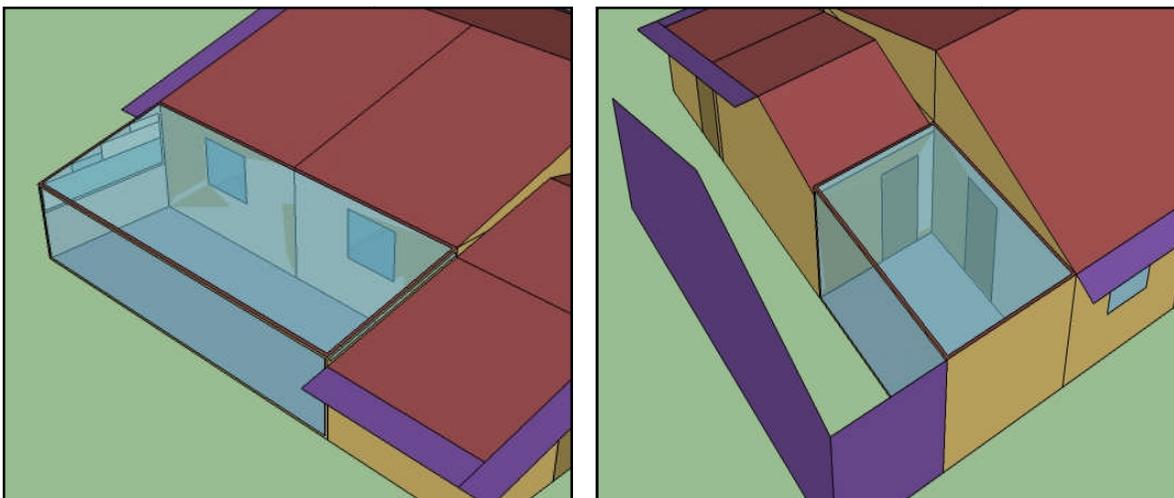


Figura 4.23. Ubicación de invernaderos propuestos. A la izquierda: invernadero adosado a los dormitorios. A la derecha: invernadero adosado a la sala y cocina (patio-invernadero).

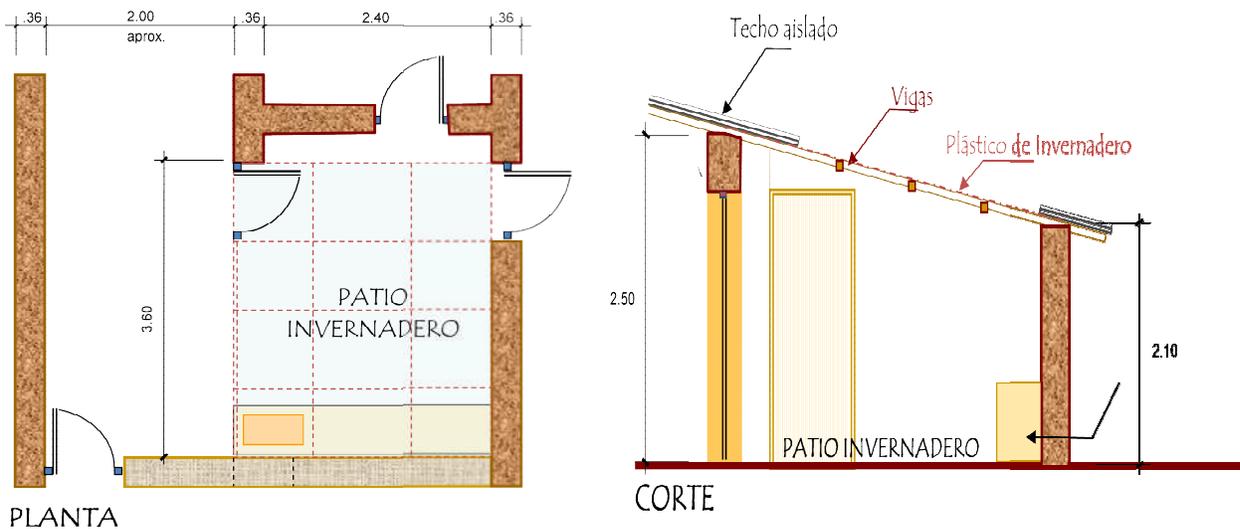


Figura 4.24. Se muestra un esquema del invernadero adosado a la sala y cocina (patio-invernadero), se plantea que el techo de este invernadero siga la caída del techo de la cocina.

### **Sellado de grietas y aberturas**

Se consideró una disminución de las infiltraciones de aire sellando los espacios existentes (grietas o aberturas) en marcos de ventanas, techos, y encuentros entre paredes y techos; usando para ello mortero de barro.

### **Cubiertas de ventanas**

Con la finalidad de evitar pérdidas nocturnas de calor a través de las ventanas y claraboyas (ubicadas en paredes y en techos respectivamente), se consideró la colocación de cubiertas de madera de 2 cm de espesor distanciadas a 2 cm del vidrio o policarbonato; estas cubiertas permitirían el ingreso de la radiación solar durante el día y la pérdida de calor durante las noches (al funcionar como aislamiento térmico).

### **Puertas**

Las puertas se mantendrán, de madera.

### **Fogón de la cocina**

Si bien el fogón de la cocina es una fuente radiante de calor, dicho efecto no se consideró en la simulación. No obstante, por motivos de salud se decidió construir un fogón mejorado, el cual evitara en gran medida la generación de humos y el gasto excesivo en leña.

#### 4.4.2. Perfil de la modelación y diversos casos

Al realizar la simulación del modelo, se establecieron las siguientes consideraciones.

- En el caso de los dormitorios, estos intercambian aire con el invernadero adosado de la siguiente forma: 1 intercambio de aire por hora (ACH en Inglés) desde las 6 a.m. hasta las 5 p.m. y 0,3 ACH en el resto del día. Cuando el invernadero no está estos ambientes intercambian aire con el exterior de la siguiente forma: 1 ACH desde las 6 a.m. hasta las 5 p.m. y 0,3 ACH en el resto del día
- En el caso de la sala, esta intercambia aire con el invernadero adosado (patio invernadero) de la siguiente forma: 1 ACH desde las 6 a.m. hasta las 5 p.m. y 0,3 ACH en el resto del día. Además intercambia masa con el exterior de la siguiente forma: 1 ACH desde las 6 a.m. hasta las 5 p.m. y 0,3 ACH en el resto del día. Cuando el invernadero no está sólo intercambia aire con el exterior.
- Se considera que el invernadero adosado a los dormitorios no intercambia aire con el exterior.
- Se considera que el invernadero adosado a la sala y cocina (patio invernadero) también intercambia aire con el exterior a razón de 1ACH todo el día.
- Se considera que la cocina intercambia masa de aire con el exterior a razón de 1ACH todo el día.
- Cuando el término "Inv" no aparezca significa que se está retirando todos los invernaderos: el adosado a los dormitorios y el adosado a la sala (patio invernadero).
- Cuando el término "Clara" aparezca significa que se está modelando los techos de la sala y los dormitorios con claraboyas translúcidas.
- El término "Piso" significa que se están aislando los pisos de: la sala, los dormitorios, y la cocina.
- En todos los casos se considera que las ventanas tienen una cubierta de madera, la cual funciona desde 5 p.m. hasta las 6 a.m. En el caso que se simulen claraboyas en el techo, las cubiertas de madera también se aplican a estas claraboyas.
- Los términos "Inf" y "Techo" significan que se está reduciendo las infiltraciones en los ambientes (según lo indicado arriba) y que se está aislando térmicamente el techo de toda la vivienda, respectivamente.

Se muestran temperaturas de los ambientes de la vivienda, resultado de las simulaciones realizadas en el modelo considerando distintas configuraciones de modificación constructiva (según lo descrito arriba).

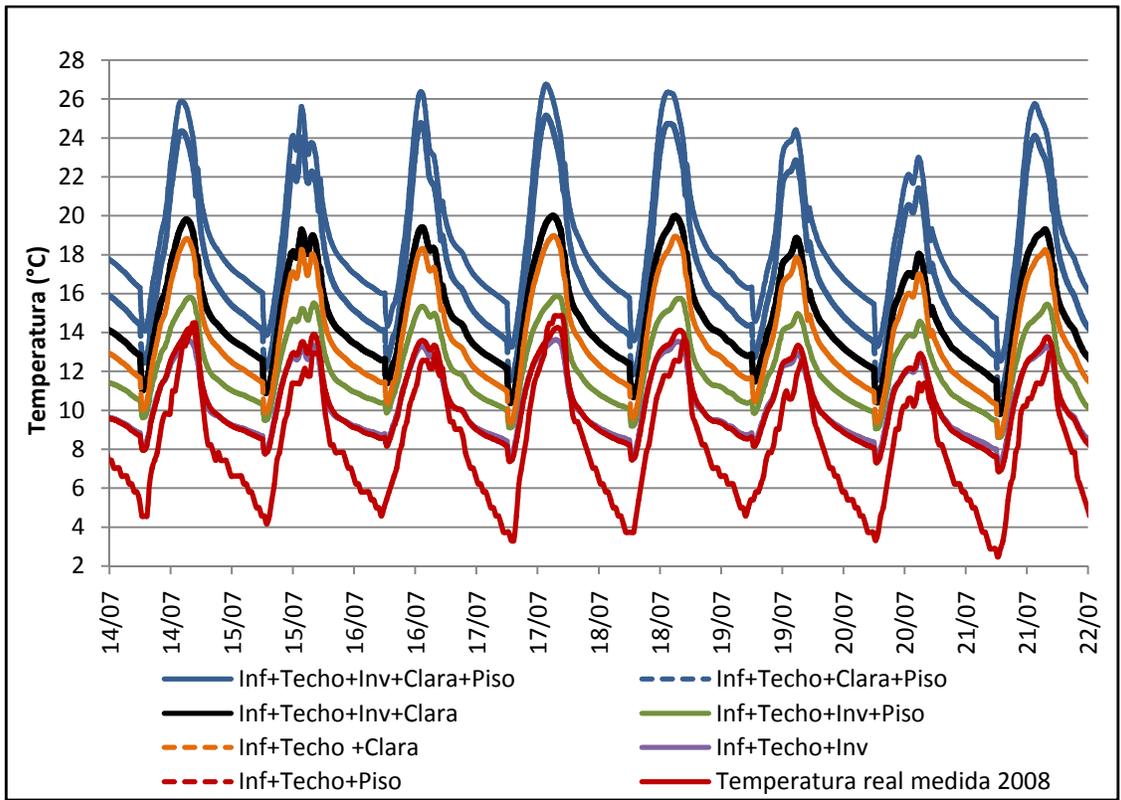
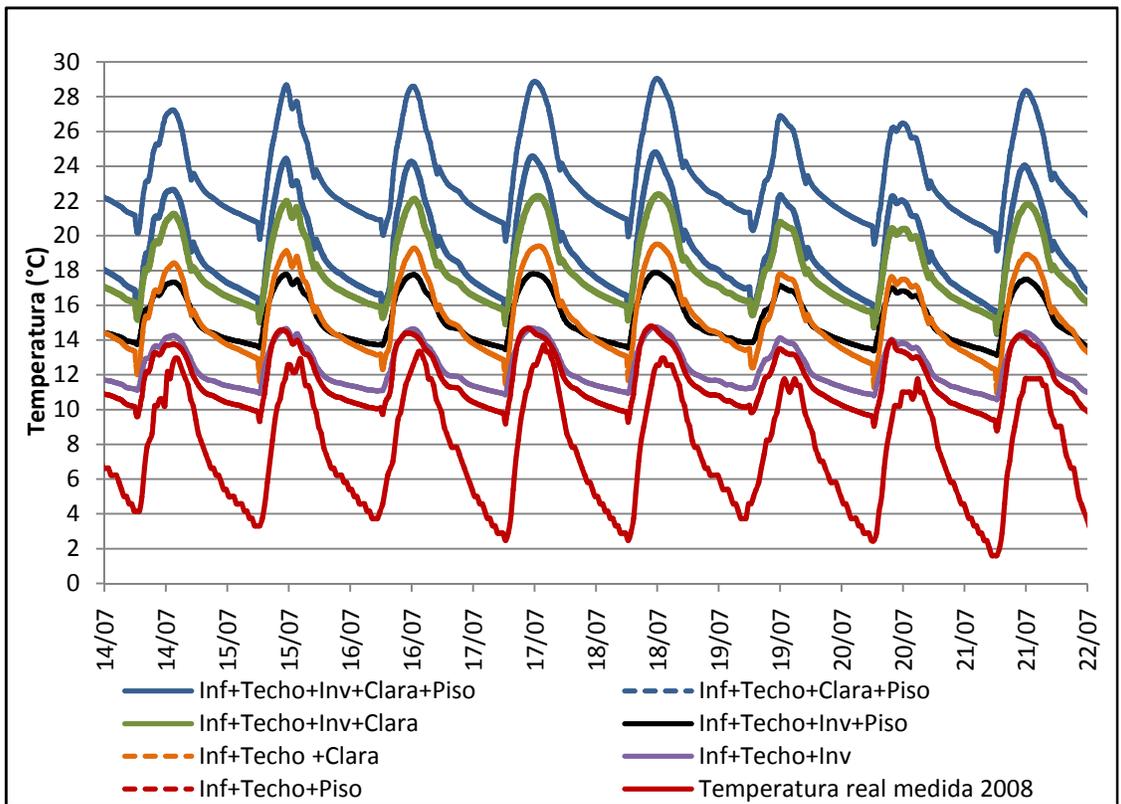


Figura 4.25. Temperaturas simuladas para el aire de los ambientes de la vivienda en el mes de julio considerando distintas configuraciones de modificación. La curva de color negro es la opción seleccionada. Arriba: para el dormitorio 1. Abajo: para la Sala.

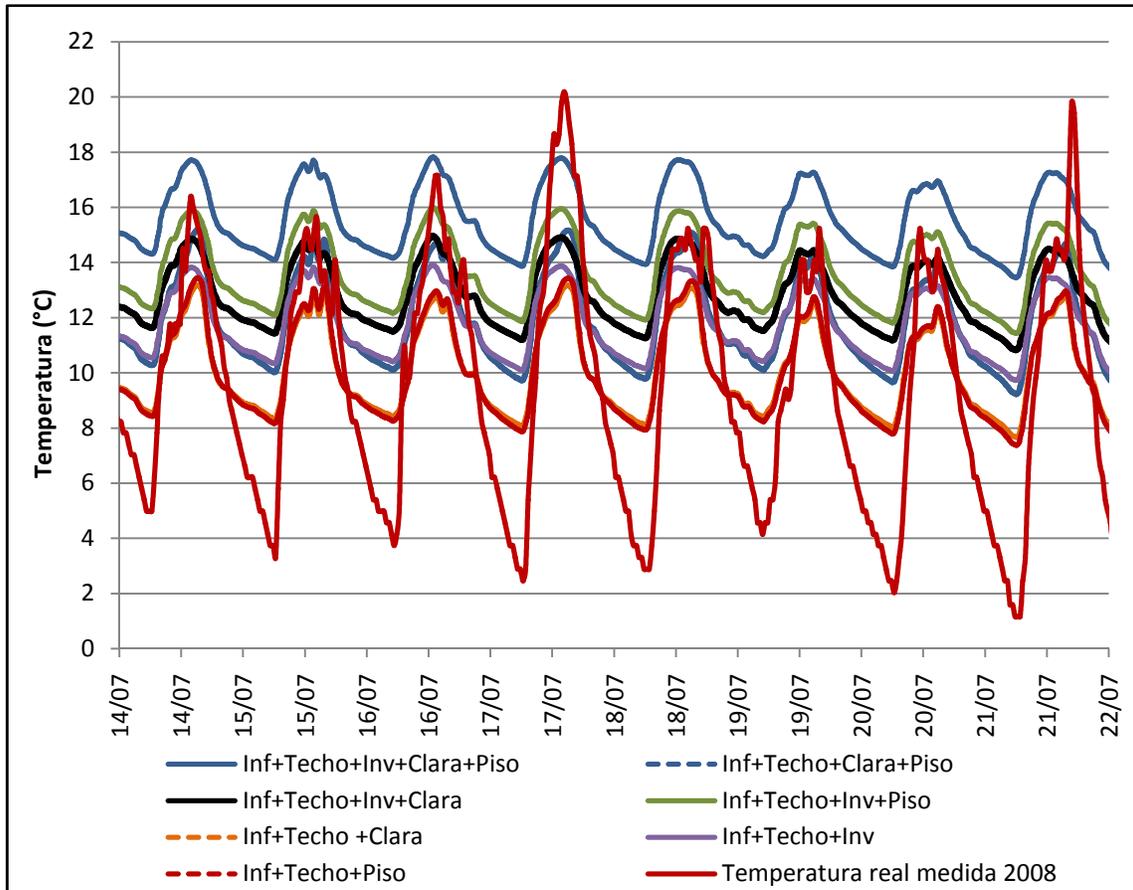


Figura 4.26. Temperaturas simuladas para el aire de los ambientes de la vivienda en el mes de julio considerando distintas configuraciones de modificación. La curva de color negro es la opción seleccionada. Para la cocina.

#### 4.4.2.1. Observaciones y discusiones

Dentro de las consideraciones hechas en el modelo de simulación, se optó por establecer las infiltraciones e intercambios de aire entre ambientes e invernaderos como “1 ACH desde las 6 a.m. hasta las 5 p.m. y 0,3 ACH en el resto del día”, basados en estudios estadísticos de viviendas típicas norteamericanas en los cuales se menciona que la ventilación de dichas viviendas está alrededor de 1ACH. Para el periodo nocturno se plantea una disminución de las infiltraciones a un valor de 0,3 ACH bajo la asunción de que las personas cierran ventanas y puertas. (Walker, 2 005)

Como se mencionó en el marco teórico, usualmente se asume que en un ambiente una persona en reposo o actividad ligera sentirá confort térmico a una temperatura y H.R. del aire de 22 °C y 50% respectivamente; sin embargo para nuestro contexto esto no es adecuado por la siguiente razón.

**El poblador altoandino durante gran parte de su vida vive por encima de los 3 000 m.s.n.m. desarrollando por ello una fisiología adecuada al medio y estando su organismo**

**acostumbrado (hasta cierto punto) a condiciones climáticas frías; es por ello que basarse en valores de temperatura de confort convencionales, que fueron obtenidos para pobladores europeos, es inadecuado ya que el medio y el poblador con el que se trabaja son distintos.**

En la configuración de modificación final seleccionada, se tomó como prioridad el elevar los mínimos de temperaturas en los ambientes de la vivienda. También se optó por proponer en cada ambiente de la vivienda un juego de distintas opciones (por ej. claraboyas en el techo sin aislar el piso o piso aislado sin claraboyas, etc.) a fin de ver el efecto de estas opciones sobre la temperatura de cada ambiente.

#### 4.4.3. Modelo final

Resultado de la simulación de las distintas configuraciones se optó por seleccionar una configuración final a ser aplicada constructivamente en la modificación de la vivienda. Dicha configuración se describe a continuación.

- Todos los ambientes tienen el techo aislante.
- En la sala: 5 claraboyas de policarbonato, cada una de 1,2 m x 1 m, las cuales se cubren de noche según lo detallado anteriormente, no se aísla el piso.
- En los dormitorios: pisos aislados según la configuración mencionada, no se consideran claraboyas.
- Invernaderos: uno adosado a los dormitorios y otro adosado a la sala y la cocina.
- En la cocina: se construyó un fogón mejorado que tiene una mayor eficiencia en el consumo de leña y casi no humea.
- En la cocina: no se aísla el piso.

Por todo lo demás, en la simulación de este modelo final se siguieron las consideraciones mencionadas en la sección anterior.

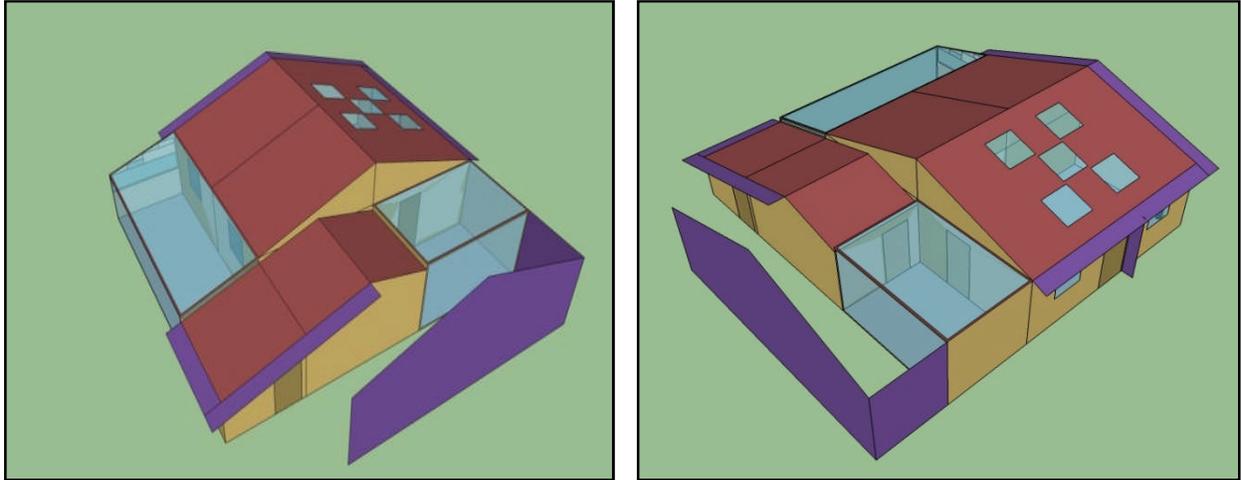


Figura 4.27. Vistas del modelo final en el programa de dibujo Google SketchUp de modificaciones constructivas. Se aprecia la ubicación de las claraboyas en la sala.

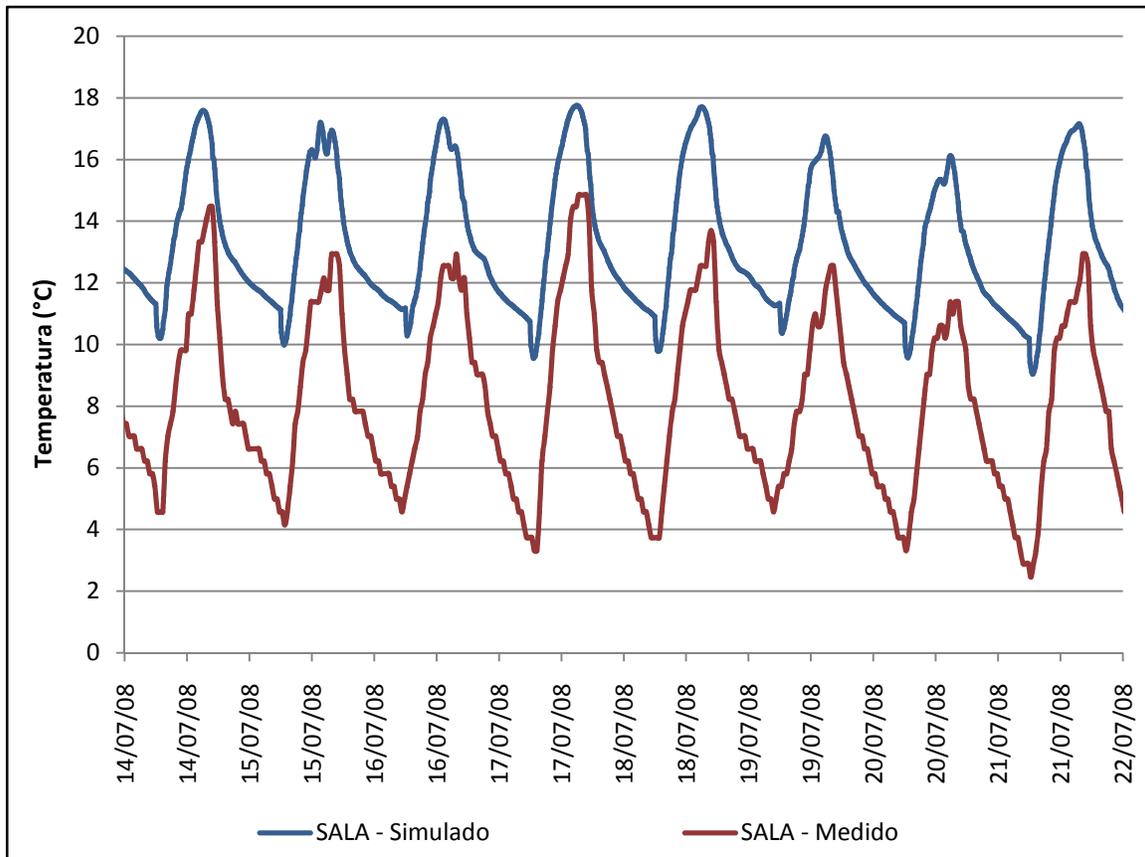


Figura 4.28. Temperaturas simuladas para el aire de los ambientes de la vivienda según la configuración final seleccionada. La curva roja son temperaturas reales registradas en julio del 2 008. Para la Sala.

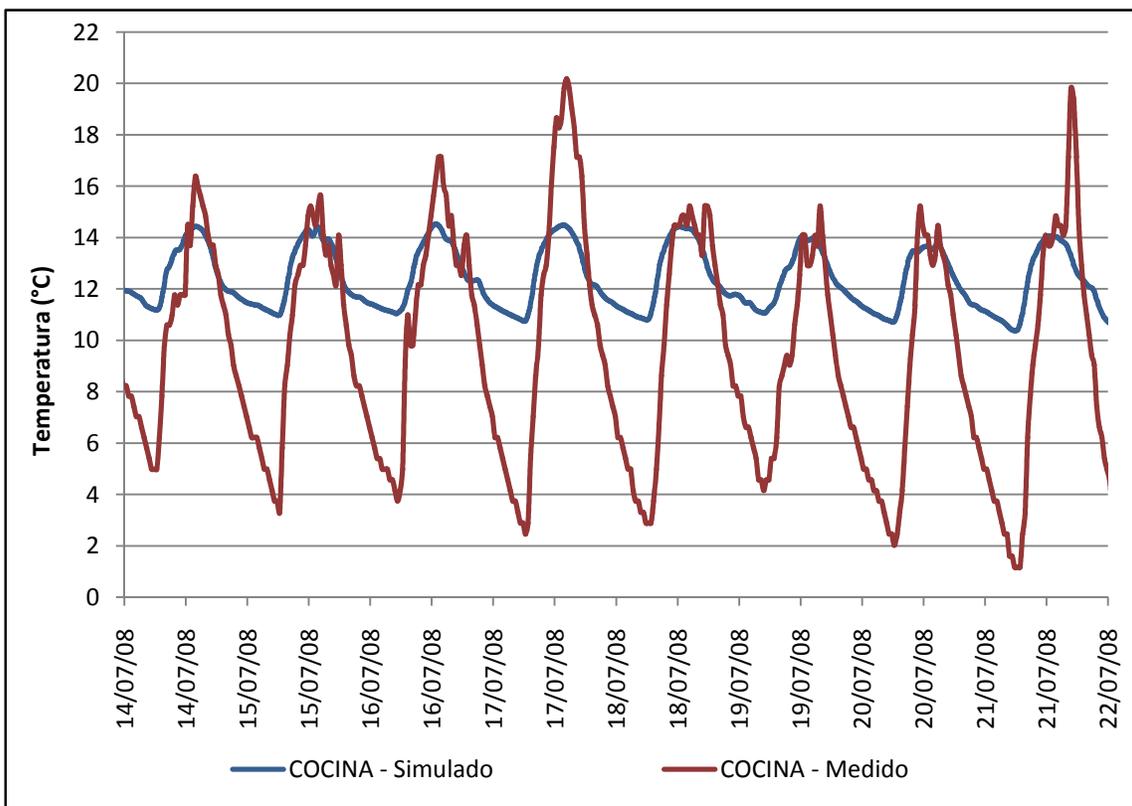
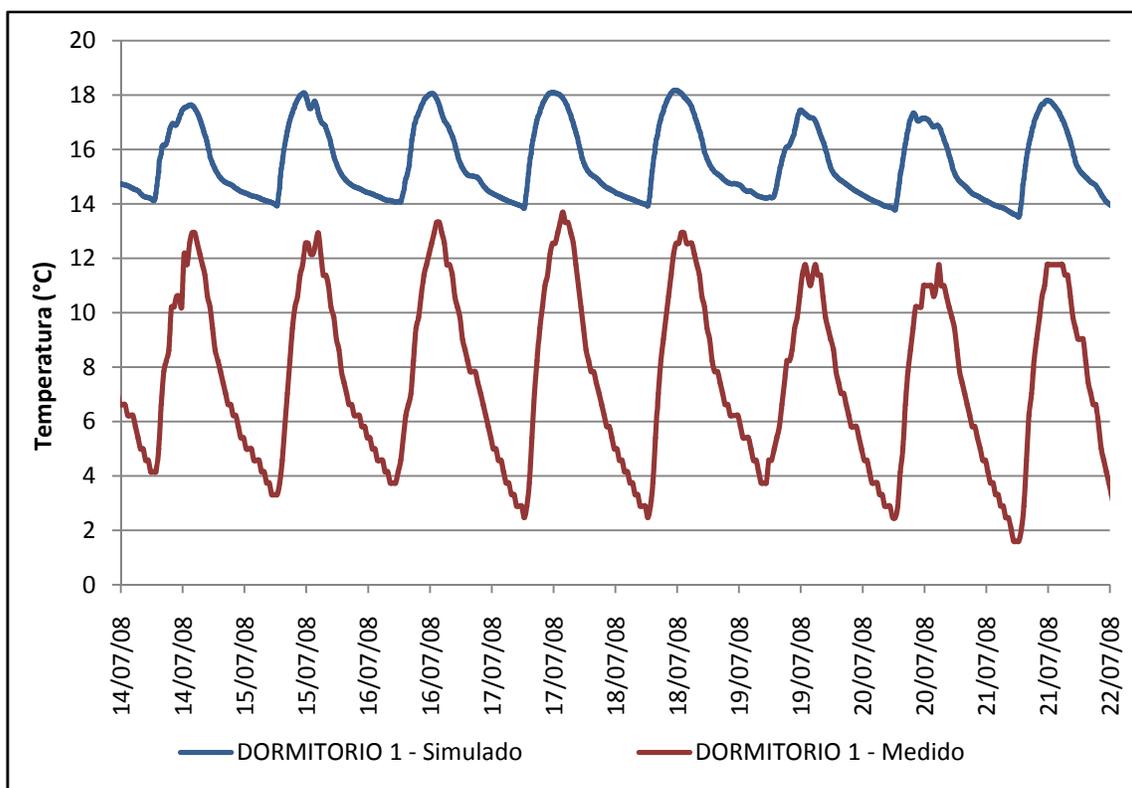


Figura 4.29. Temperaturas simuladas para el aire de los ambientes de la vivienda según la configuración final seleccionada. La curva roja son temperaturas reales registradas en julio del 2 008. Arriba: para el Dormitorio 1. Abajo: para la Cocina.

A continuación se muestra una comparación entre el aislamiento térmico asociado a cada elemento de la vivienda, antes y después de las modificaciones constructivas propuestas.

*Tabla 4.4. Comparación entre el aislamiento térmico de cada elemento de la vivienda original con el aislamiento térmico propuesto en la configuración de modificación final.*

Compon ente construc tivo	Dura- bili- dad (según fabri- cante) [años]	Previo a la modificación				Posterior a la modificación			
		Espesor [m]	Con- ductivi- dad térmica [W/(m* K)]	Resis- tencia térmica equiva- lente [(m <sup>2</sup> *K) /W]	Trans- mitancia térmica equiva- lente [W/(m <sup>2</sup> * K)]	Espesor [m]	Con- ductivi- dad térmica [W/(m* K)]	Resis- tencia térmica equiva- lente [(m <sup>2</sup> *K) /W]	Transmi- tancia térmica equiva- lente [W/(m <sup>2</sup> * K)]
<b>Muros</b>				<b>0,447</b>	<b>2,2</b>			<b>0,447</b>	<b>2,2</b>
Adobe	-	0,38	0,85			0,38	0,85		
<b>Techos</b>				<b>2E-06</b>	<b>500000</b>			<b>1,648</b>	<b>0,6</b>
Fibrocem ento	15	-	-			0,004	0,18		
Aire	-	-	-			0,04	0,0246		
Calamina metálica	-	0,0005	237			0,0005	237		
<b>Suelos</b>				<b>0,385</b>	<b>2,6</b>			<b>3,44</b>	<b>0,3</b>
Madera	5	-	-			0,02	0,12		
Aire	-	-	-			0,07	0,0246		
Piedra	-	-	-			0,15	3,5		
Tierra	-	0,2	0,52			0,2	0,52		
<b>Ventanas</b>				<b>0,003</b>	<b>333,3</b>			<b>1,371</b>	<b>0,7</b>
Cubierta de lana	-	-	-			0,02	0,036		
Aire	-	-	-			0,02	0,0246		
Vidrio	-	0,003	1,028			0,003	1,028		

#### 4.4.3.1 Observaciones y discusiones

En las temperaturas simuladas para los dormitorios se observa que los mínimos de temperatura están alrededor de los 14°C. Para el caso de la sala los mínimos están alrededor de 10°C y para la cocina están alrededor de los 11°C.

En la tabla de comparación de aislamientos, es oportuno mencionar que el techo aislante propuesto posee una transmitancia térmica de 0,6 W/(m<sup>2</sup>\*K) (8 333 veces menos que la transmitancia del techo original de calamina metálica); este valor de 0,6 W/(m<sup>2</sup>\*K) es similar a los aislamientos térmicos de techo propuestos por las normativas portuguesas, según se indica en una tabla de la sección antecedentes internacionales.

#### 4.5. MEDICIONES TÉRMICAS POSTERIORES A LA MODIFICACIÓN

Una vez definidas las modificaciones constructivas a realizar, estas se implementaron desde el 20 de abril al 20 de mayo del 2009. Se muestran imágenes de la vivienda durante y después de las obras. **En el anexo se muestran los planos de la vivienda posterior a las modificaciones.**



*Figura 4.30. Aislamiento térmico del techo. Colocación de correas de pino seco.*



*Figura 4.31. Aislamiento térmico del techo. Colocación del colchón de ichu.*



*Figura 4.32. Arriba: detalle de colocación de planchas de fibrocemento y las claraboyas translúcidas. Medio: techo terminado. Abajo: Hojas interiores de triplay en las claraboyas.*



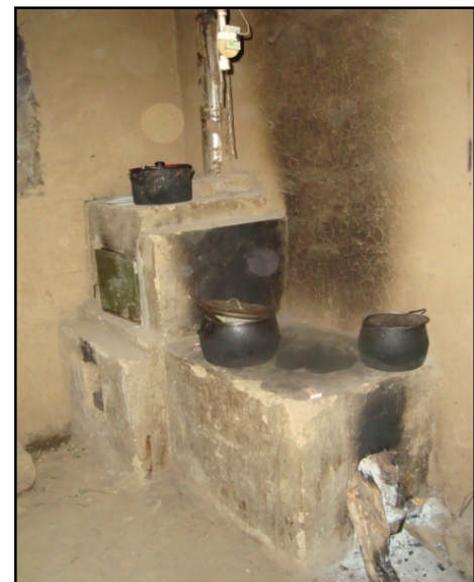
*Figura 4.33. Arriba: en las claraboyas, hojas interiores de triplay cerradas. Medio: hojas de madera en ventanas. Abajo: muros de la fachada principal e interiores tarrajeados con barro.*



*Figura 4.34. Arriba: proceso de sellado de los intersticios usando barro. Medio: colocación de la cama de piedras y durmientes de madera. Abajo: instalación del entablado de madera.*



*Figura 4.35. Arriba: detalle del invernadero adosado a los dormitorios. Medio: vista general del invernadero instalado, adosado a los dormitorios. Abajo: detalle del invernadero frontal instalado (patio-invernadero).*



*Figura 4.36. Arriba: invernadero instalado en la parte frontal de la vivienda. Medio: ductos de intercambio de aire entre invernadero y ambientes interiores, con sus respectivas tapas de madera. Abajo: construcción de la cocina mejorada con horno.*



*Figura 4.37. Arriba: vista frontal de la vivienda remodelada. Abajo: vista posterior de la vivienda remodelada.*

Posterior a las modificaciones constructivas se procedió nuevamente a hacer mediciones al interior de la vivienda; a continuación se muestran las curvas de temperatura registradas en el 2 009 respecto a resultados previos.

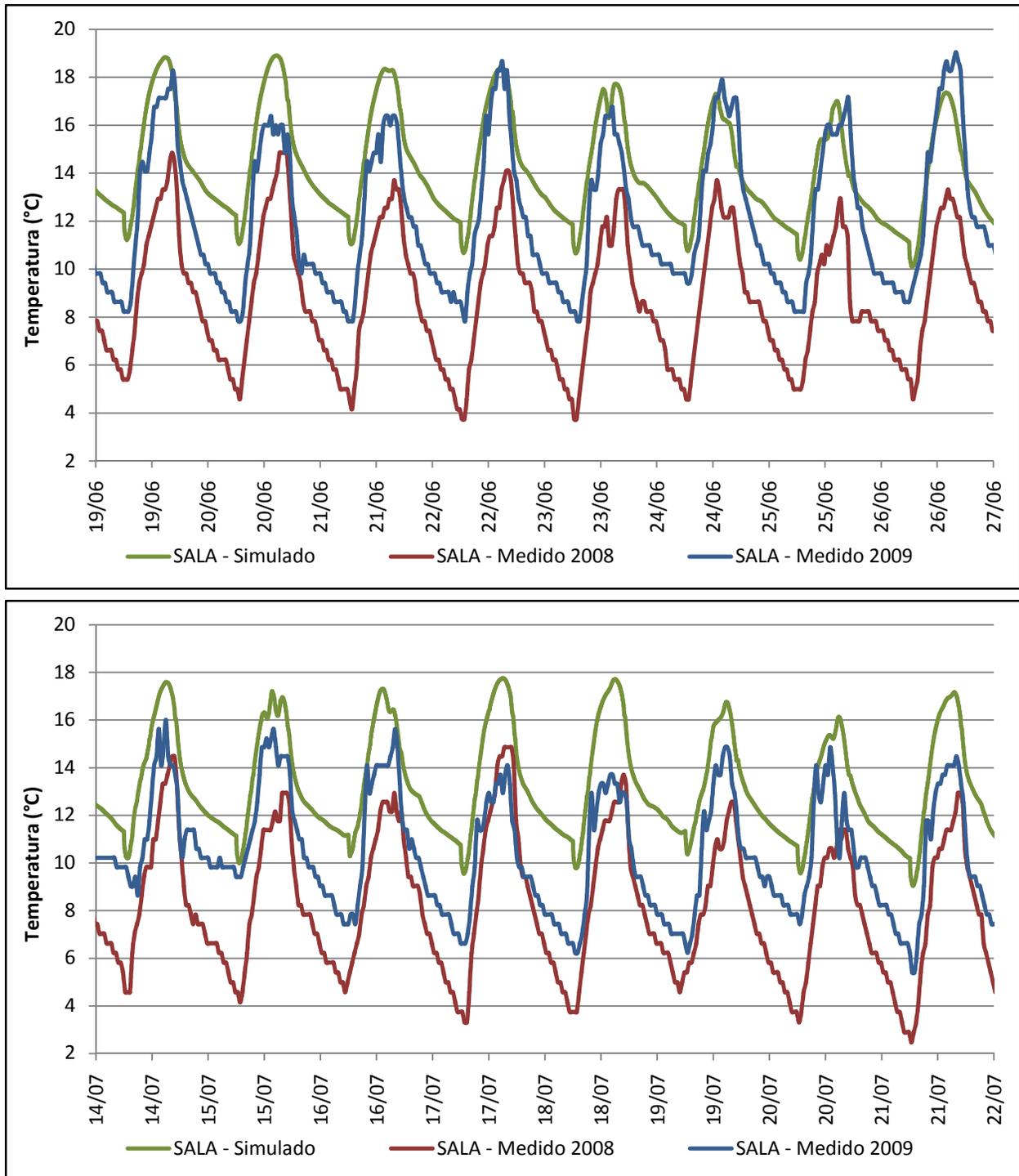


Figura 4.38. Comparación de temperaturas de aire en los ambientes antes y después de las modificaciones constructivas. Para la Sala en los meses de junio y julio.

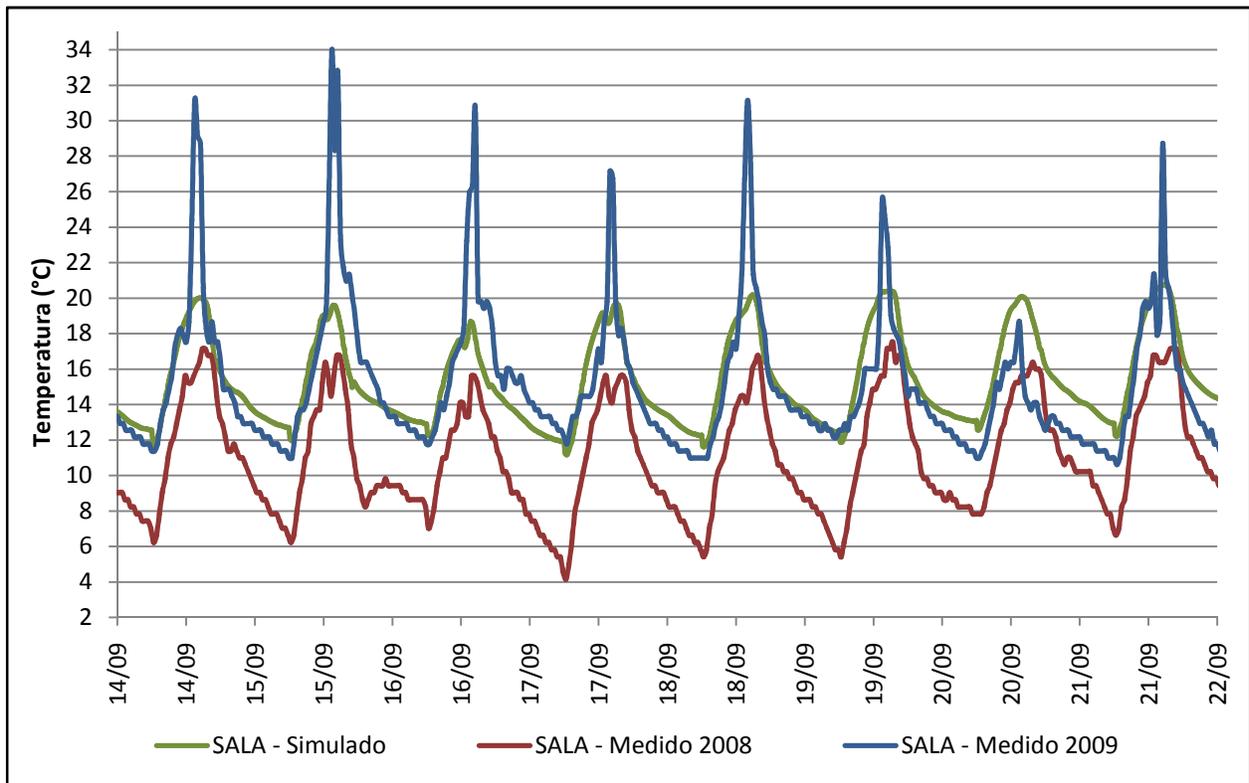
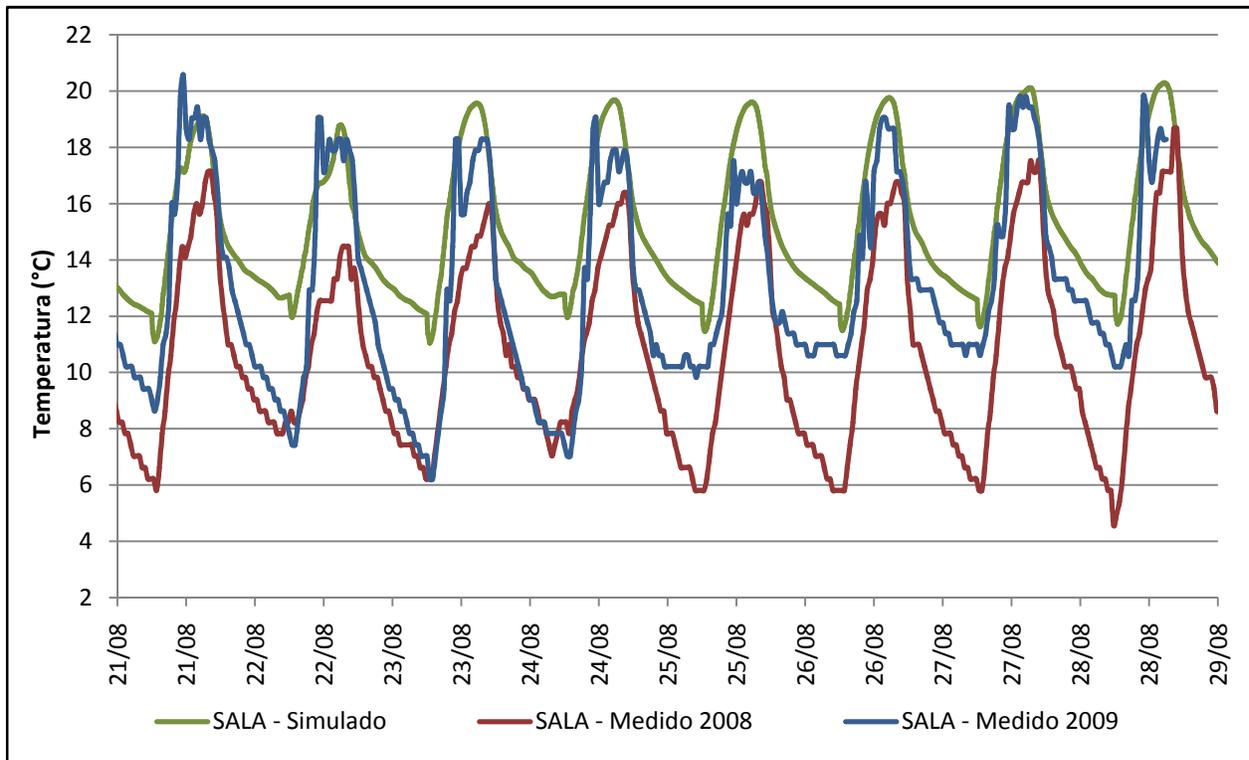


Figura 4.39. Comparación de temperaturas de aire en los ambientes antes y después de las modificaciones constructivas. Para la Sala en los meses de agosto y septiembre.

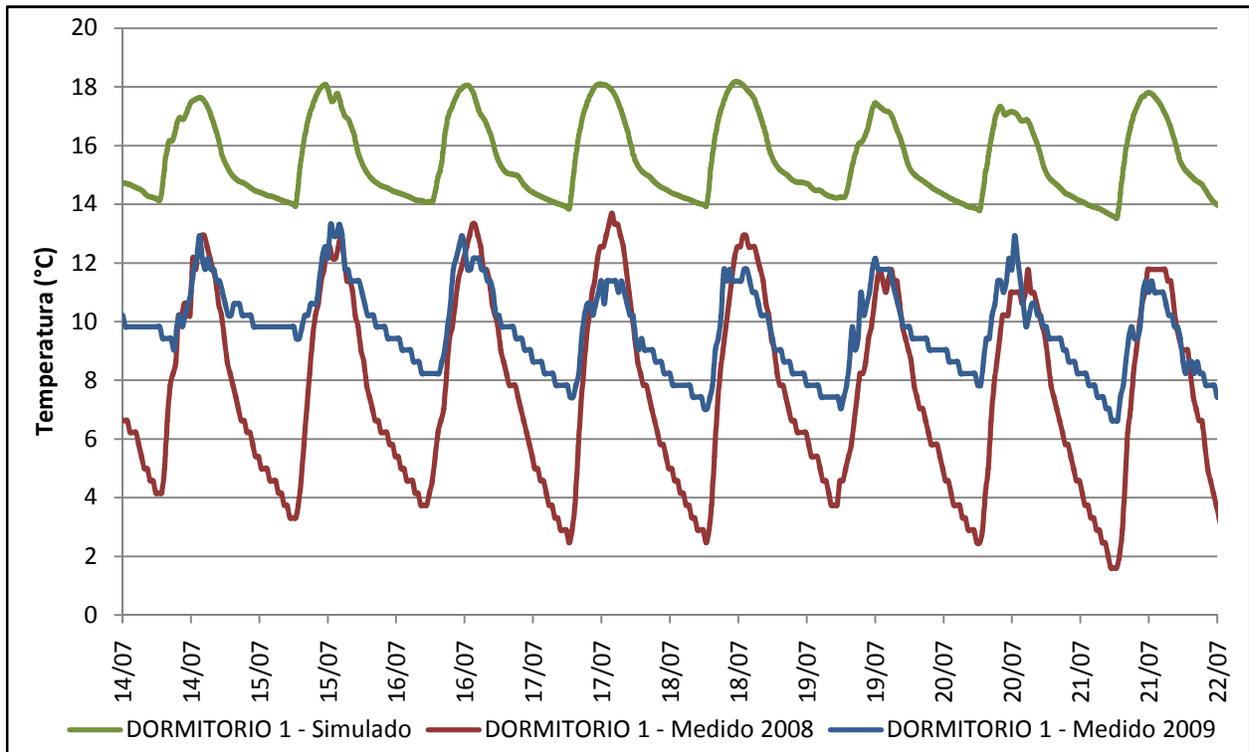
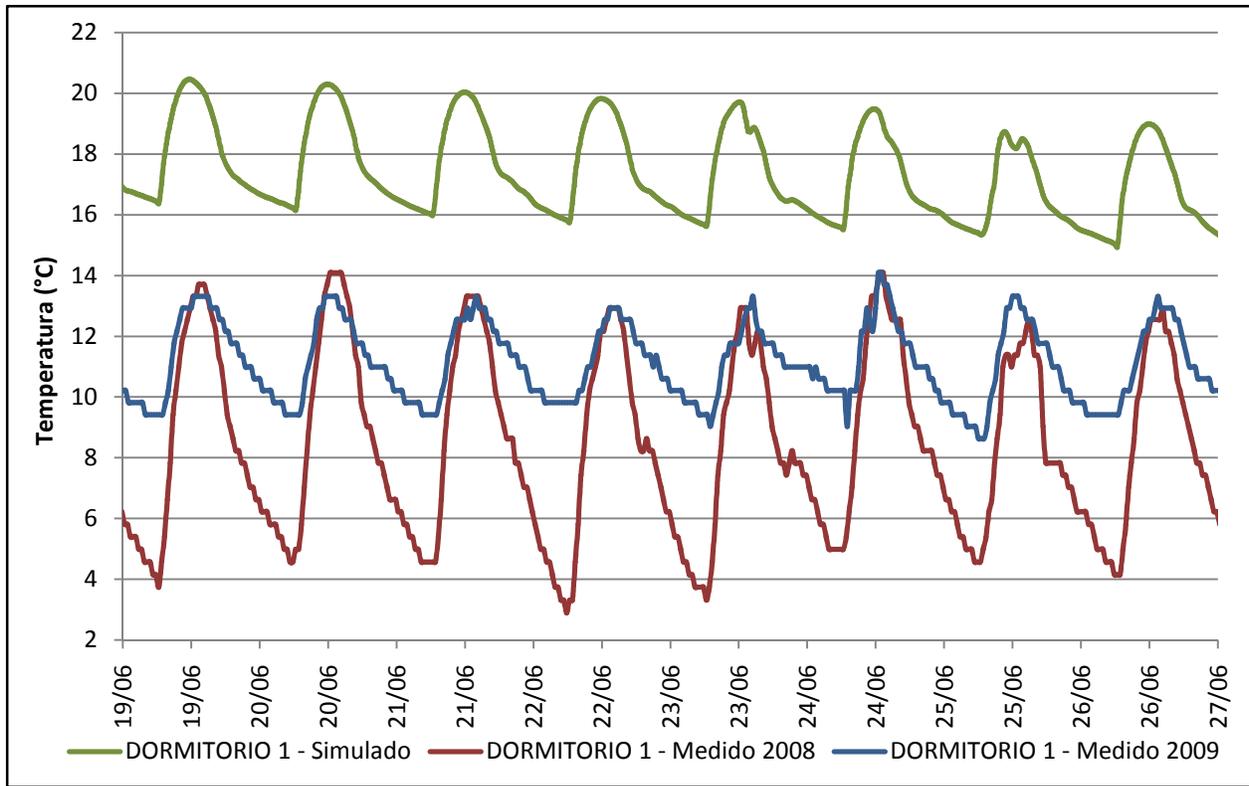


Figura 4.40. Comparación de temperaturas de aire en los ambientes antes y después de las modificaciones constructivas. Para el Dormitorio 1 en los meses de junio y julio.

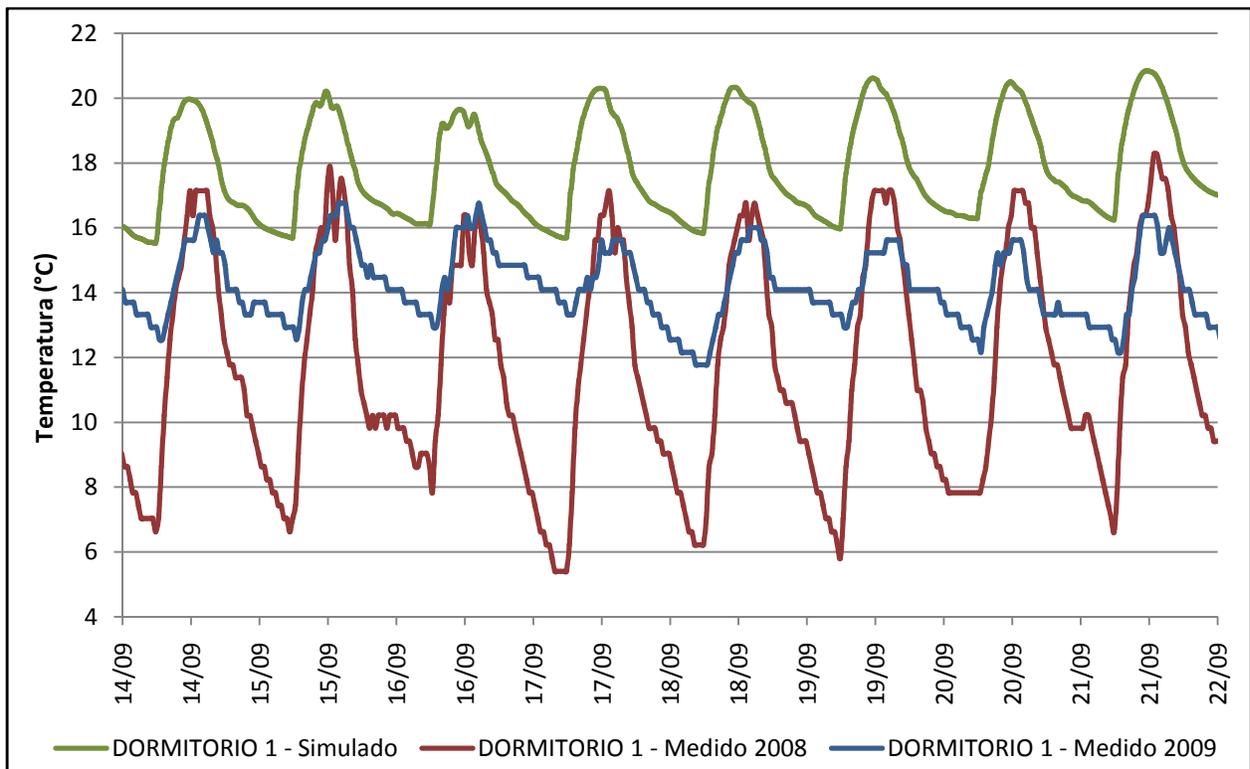
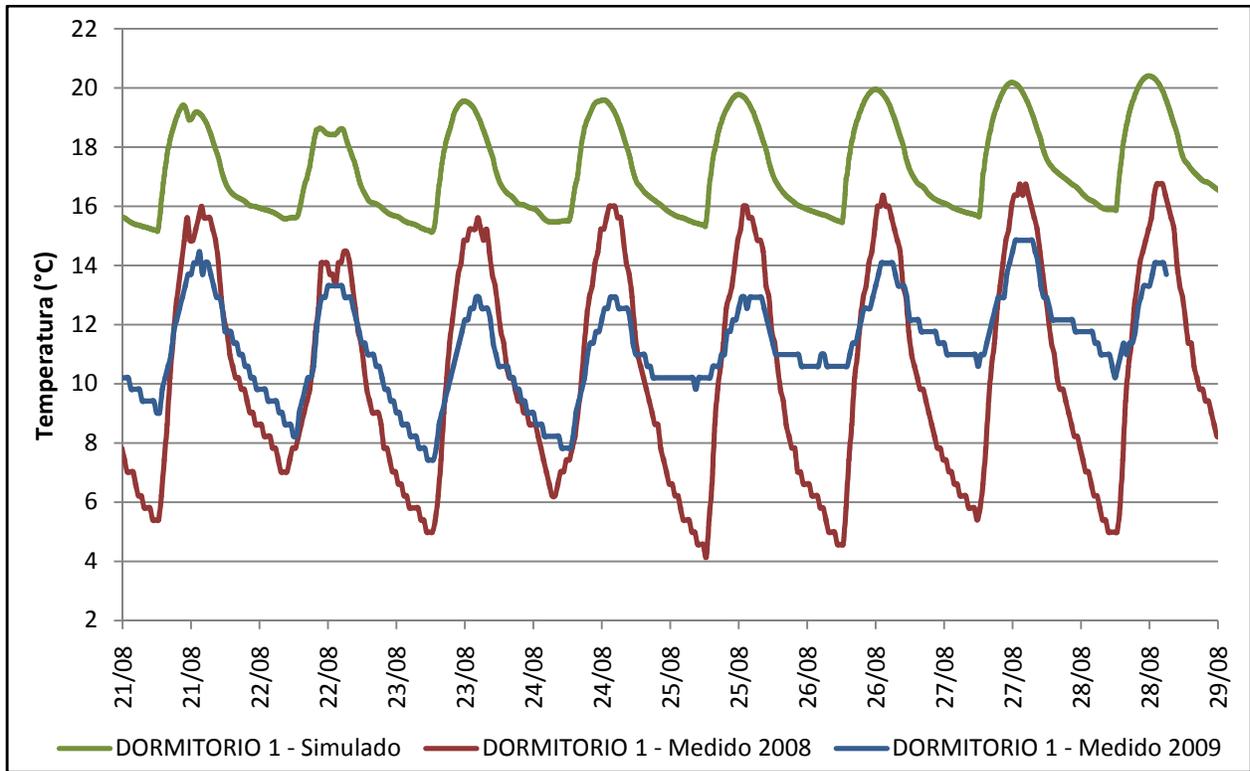


Figura 4.41. Comparación de temperaturas de aire en los ambientes antes y después de las modificaciones constructivas. Para el Dormitorio 1 en los meses de agosto y septiembre.

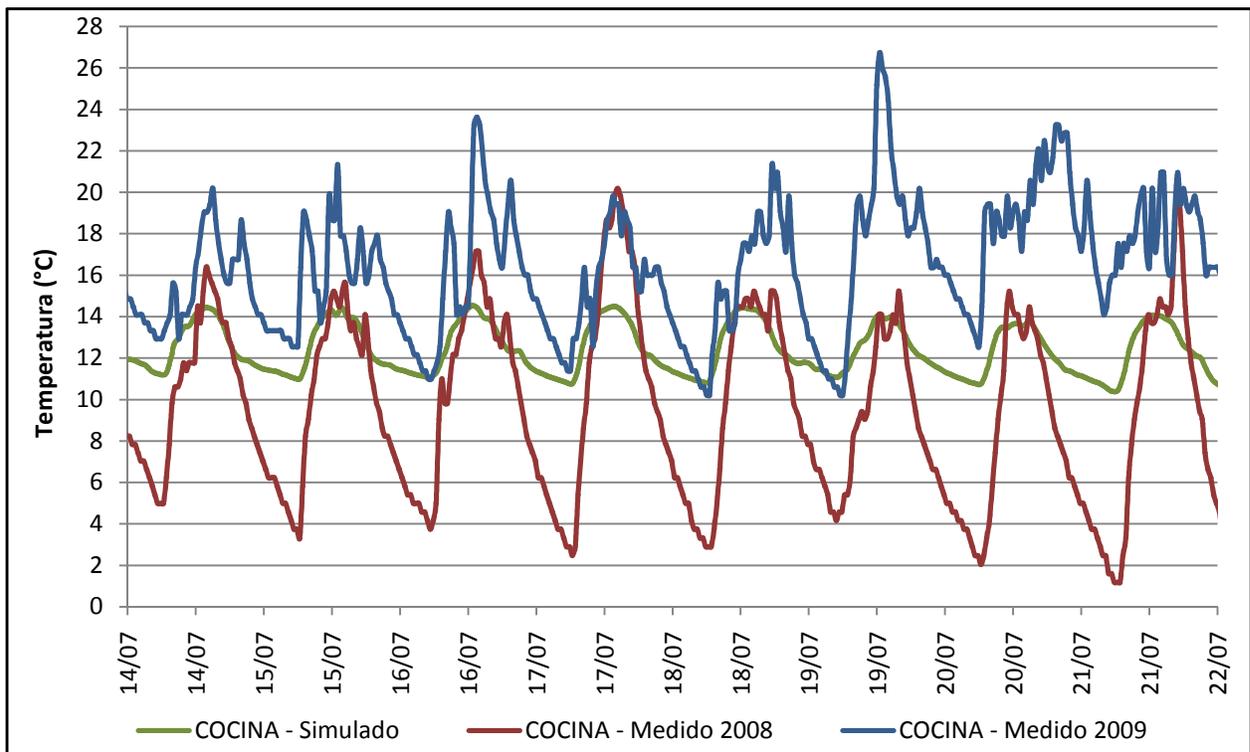
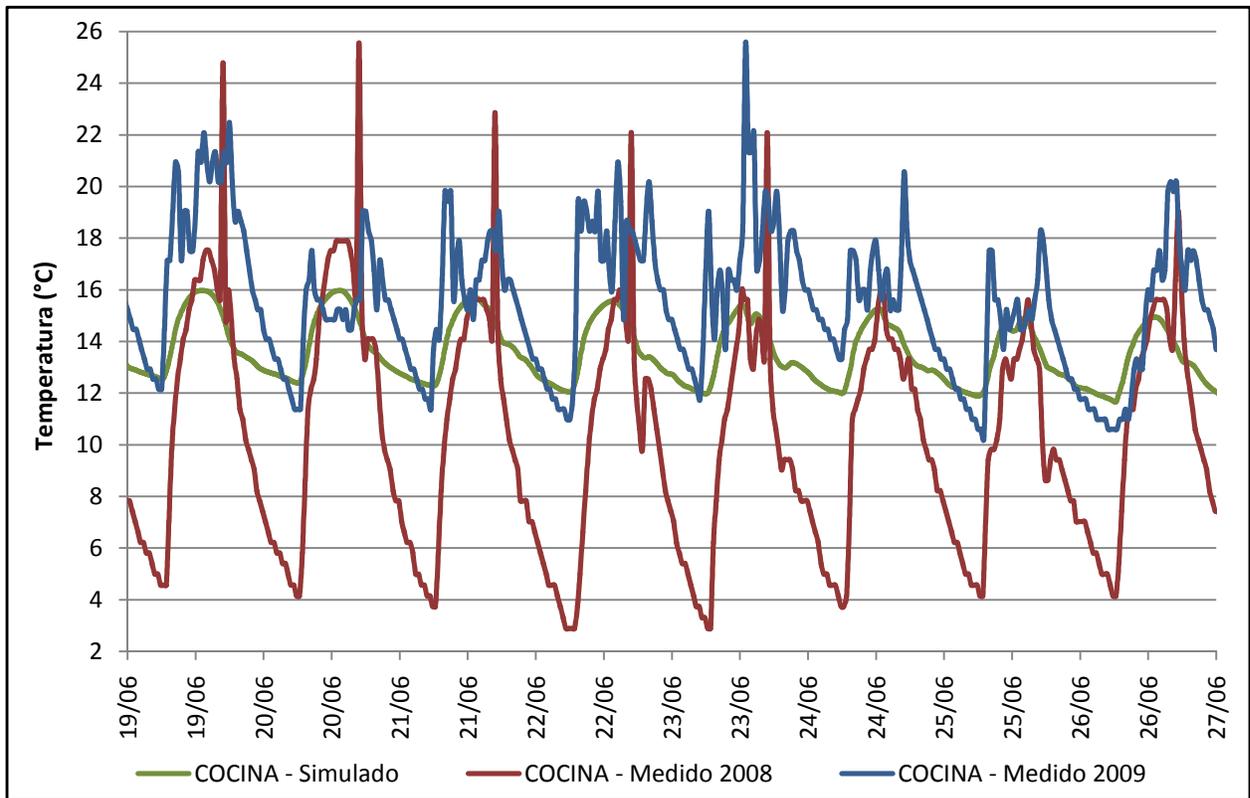


Figura 4.42. Comparación de temperaturas de aire en los ambientes antes y después de las modificaciones constructivas. Para la Cocina en los meses de junio y julio.

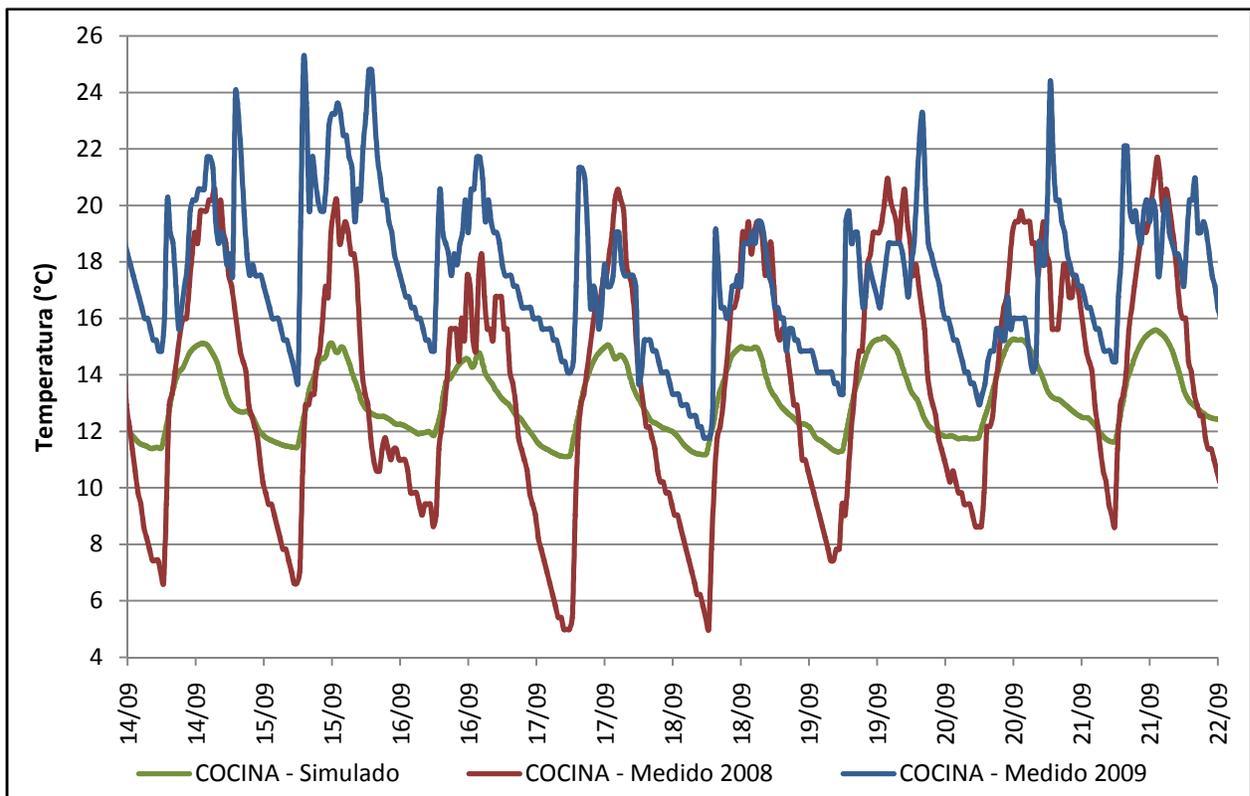
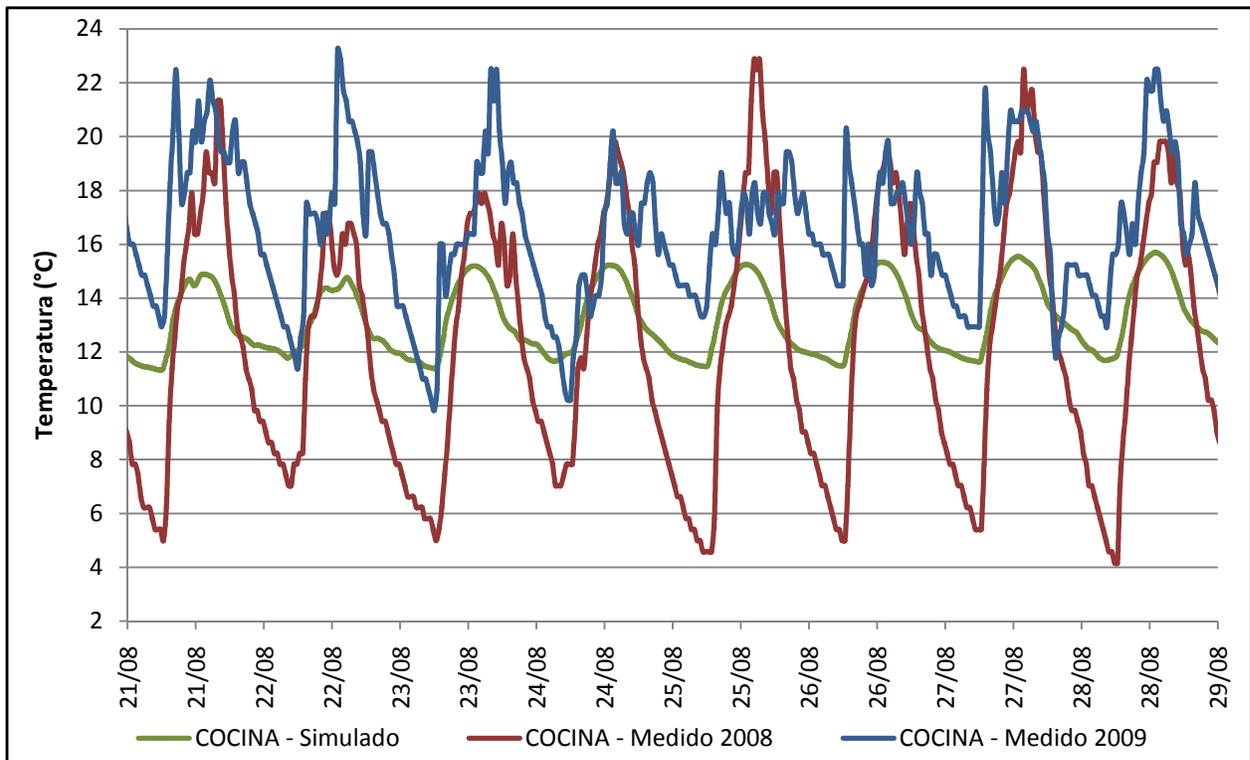


Figura 4.43. Comparación de temperaturas de aire en los ambientes antes y después de las modificaciones constructivas. Para la Cocina en los meses de agosto y septiembre.

Tabla 4.5. Valores promedio mensuales. Comparación entre las temperaturas de aire registradas en los ambientes de la vivienda en el 2 008 (antes de la modificación) y el 2 009 (posterior a la modificación).

	Temperatura promedio mensual diaria en la SALA (°C)	Temperatura máxima promedio mensual en la SALA (°C)	Temperatura mínima promedio mensual en la SALA (°C)	Temperatura promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]	Temperatura máxima promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]	Temperatura mínima promedio mensual de Dormitorio 1 [°C]
<b>Medido en Junio del 2008</b>	9,2	14,1	5,4	8,8	13,3	5,0
Medido en Junio del 2009	12,1	17,7	7,8	11,0	13,5	8,9
Simulado para Junio	14,1	17,9	10,9	17,5	19,8	15,9
<b>Medido en Julio del 2008</b>	8,3	13,7	3,9	7,6	12,8	3,1
Medido en Julio del 2009	11,0	15,9	7,4	10,2	12,3	8,4
Simulado para Julio	13,2	17,3	9,8	15,6	17,9	13,9
<b>Medido en Agosto del 2008</b>	9,7	15,3	5,4	9,4	14,7	4,8
Medido en Agosto del 2009	11,6	17,4	7,5	10,4	13,0	8,2
Simulado para Agosto	13,9	18,2	10,6	16,1	18,5	14,4
<b>Medido en Septiembre del 2008</b>	11,1	16,6	6,8	11,4	16,8	6,9
Medido en Septiembre del 2009	14,8	25,6	11,0	13,8	15,8	12,1
Simulado para Septiembre	15,4	19,8	12,2	17,8	20,2	16,1

Tabla 4.6. Valores promedio mensuales. Comparación entre las temperaturas de aire registradas en los ambientes de la vivienda en el 2 008 (antes de la modificación) y el 2 009 (posterior a la modificación).

	Temperatura promedio mensual de Dormitorio 2 [°C]	Temperatura máxima promedio mensual de Dormitorio 2 [°C]	Temperatura mínima promedio mensual de Dormitorio 2 [°C]	Temperatura promedio mensual de la Cocina [°C]	Temperatura máxima promedio mensual de la Cocina [°C]	Temperatura mínima promedio mensual de la Cocina [°C]
<b>Medido en Junio del 2008</b>	9,3	14,0	5,7	10,7	20,5	5,1
Medido en Junio del 2009	10,9	13,8	8,6	16,0	21,8	11,2
Simulado para Junio	16,3	18,5	14,8	13,7	15,5	12,3
<b>Medido en Julio del 2008</b>	8,5	13,9	4,4	9,6	17,1	3,1
Medido en Julio del 2009	10,2	13,1	8,1	15,7	20,9	11,2
Simulado para Julio	14,6	16,9	13,0	12,4	14,3	10,8
<b>Medido en Agosto del 2008</b>	10,1	15,7	5,8	11,1	18,8	4,7
Medido en Agosto del 2009	10,5	14,2	7,9	16,0	21,1	11,5
Simulado para Agosto	15,4	17,8	13,8	12,5	14,5	10,9
<b>Medido en Septiembre del 2008</b>	11,8	17,7	7,6	13,2	20,7	6,9
Medido en Septiembre del 2009	13,8	16,8	11,6	17,4	22,1	13,8
Simulado para Septiembre	17,3	19,7	15,7	13,3	15,2	11,7

#### 4.5.1. Observaciones y discusiones

En la sala, para los meses de junio a septiembre, los mínimos promedio de temperatura registrados después de las modificaciones oscilaron entre 7,4 a 11°C.

En la sala, posterior a las modificaciones, se observó un incremento desde 2 a 3°C de los mínimos de temperatura para los meses de junio a agosto del 2 009, respecto a los mínimos del 2 008; no obstante, en el mes de septiembre el incremento de estos mínimos de temperatura es de aproximadamente 4,2°C respecto a los medidos en el 2 008. Una de las explicaciones de esto es que a fines del mes de julio las paredes interiores de la vivienda fueron tarrajeadas con barro, por ello la humedad del tarrajeo pudo haber tenido alguna influencia en la eficacia de las modificaciones constructivas ya que el agua tiene una conductividad térmica mayor al adobe. Otra razón fue que las cubiertas de madera de las ventanas no pudieron ser instaladas sino hasta el 21 de agosto por lo que esto tuvo cierta influencia en el enfriamiento nocturno. Por último, ciertamente la razón más influyente fue que las cubiertas de triplay de las claraboyas del techo recién se instalaron a fines de agosto, por lo que desde junio hasta agosto estas claraboyas permitieron una fuga de calor; es por ello que el mayor incremento de los mínimos de temperatura es registrado en el mes de septiembre y tiene su razón de ser en la colocación de estas cubiertas como protección nocturna.

En el dormitorio 1 los mínimos promedio de temperatura registrados después de la modificación, para los meses de junio a septiembre, oscilaron entre 8,2 y 12,1°C.

En el dormitorio 1, posterior a las modificaciones, se observó un incremento desde 3,4 a 5,3°C de los mínimos de temperatura para los meses de junio a septiembre del 2 009, respecto a los mínimos del 2 008; siendo el mes de agosto donde se dió el menor incremento (3,4°C). La explicación de esto es que a fines de julio se realizó el tarrajeo de muros interiores en los dormitorios, por ello la humedad del tarrajeo pudo haber tenido alguna influencia en la eficacia de las modificaciones constructivas durante el mes de agosto ya que el agua tiene una conductividad térmica mayor al adobe. Por otro lado, cabe mencionar que los ductos de intercambio de aire entre invernaderos y dormitorios recién pudieron ser instalados el 16 de agosto, y además las cubiertas de madera para las ventanas recién se instalaron el 21 de agosto por lo que hasta antes de esa fecha los efectos de las modificaciones no pudieron ser vistos a plenitud.

En la cocina los mínimos promedio de temperatura registrados después de la modificación, para los meses de junio a septiembre, oscilaron entre 11,2 y 13,8°C.

En la cocina, posterior a las modificaciones, se observó un incremento de 6 a 8°C de los mínimos de temperatura para los meses de junio a septiembre del 2 009, respecto a los mínimos del 2 008; siendo el efecto de las modificaciones constructivas mayor en este ambiente que en los otros. Una de las razones de esto es el efecto radiante del fogón, el cual funciona como una fuente de calor al momento de cocinar los alimentos.

Si bien los resultados de la simulación no coinciden con las temperaturas medidas (hay una diferencia de hasta 4°C entre lo predicho y medido), cabe mencionar que una de las razones de esto es que algunas modificaciones no fueron completadas sino hasta fines de agosto (cubiertas de triplay en claraboyas, etc.) teniendo estos aspectos una influencia; no obstante, también se observa que a partir de septiembre hay una mayor coincidencia entre lo simulado y lo medido, esto asociado a que desde septiembre las modificaciones en la vivienda se concluyeron en un 100%. Por último, cabe mencionar que en la simulación se hicieron algunas consideraciones, por ej. en los intercambios de aire entre ambientes interiores y exterior o ambientes interiores e invernaderos, siendo natural que esta asunción lleve algún error asociado.

Finalmente, se observa que las modificaciones constructivas propuestas realmente tuvieron el efecto deseado; es decir, incrementaron la temperatura de los ambientes interiores de la vivienda, pasándose desde mínimos de temperatura infrahumanos (3°C) hasta mínimos de temperatura tolerables (mayores a 8°C); observándose además, el efecto interesante de una fuente radiante como el fogón para el calentamiento interior de los ambientes (esto de la mano con las propuestas de modificación constructiva ya mencionados).

## 5. CONCLUSIONES

Se logró concluir satisfactoriamente cada uno de los objetivos específicos planteados.

- La falta de aislamiento térmico de los elementos constructivos de la vivienda es una de las causas de que esta se enfríe tanto durante las noches, siendo la influencia más crítica generada por el techo de calamina metálica. También se comprobó que las infiltraciones de aire exterior, a través de rendijas o agujeros, son la otra gran causa de que la vivienda se enfríe a lo largo del día.
- Se comprobó que las modificaciones constructivas realizadas en la vivienda seleccionada, tales como: aislamiento térmico del techo, aislamiento térmico del piso, sellado de rendijas para evitar infiltraciones de aire, colocación de claraboyas en el techo, construcción de invernaderos adosados a ambientes, construcción de fogones mejorados, trajeron un beneficio térmico a los ambientes interiores, lográndose incrementar los mínimos de temperatura en todos estos. El resultado más destacable fue la elevación de los mínimos de temperatura en los dormitorios, al pasar de mínimos de temperatura incluso menores a 2°C (en el 2 008) a mínimos de temperatura superiores a los 8°C (2 009).
- A lo largo del desarrollo de esta investigación se comprobó la necesidad de manejar programas de simulación energética en edificios, siendo su uso una de las herramientas más importantes al momento de decidir por una u otra opción de modificación.
- A lo largo del desarrollo de esta investigación se comprobó la existencia de un factor muy relevante (quizá uno de los más importantes) en el éxito o fracaso del proyecto; este factor fue el social, esto debido a que el mundo altoandino es muy distinto al mundo urbano limeño en muchísimas cosas: costumbres, modos de vida, relaciones interpersonales, valores, etc. Es por ello que el establecimiento de un vínculo de confianza entre investigadores y la comunidad rural fue de vital importancia para el éxito del proyecto.
- Finalmente, este trabajo de tesis plantea una propuesta técnica que pretende ser un aporte en la solución del terrible problema generado por el friaje en las viviendas de las zonas altoandinas, que como es sabido cada año trae consecuencias mortales en niño y ancianos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

ESPINOZA, R.; HUAYLLA, F. et al. (2009): “Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente – AVERMA*, vol. 13, pp. - .

IBAÑEZ, P.; ROSELL, J.R.; y ROSELL, J.I. (2005): *Tecnología Solar*. EDICIONES MUNDIPRENSA. MADRID.

MORILLON, D. (2004): *Atlas del bioclima de México*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. MÉXICO, DF.

GONÇALVES, H. y MARIZ GRAÇA, J. (2004): *Conceitos Bioclimaticos para os Edifícios em Portugal*. INETI. LISBOA.

MONDELO, P.; TORADA, E.; COMAS, S.; CASTEJÓN, V. y LACAMBRA, E. (1999): *Confort y estrés térmico*. EDICIONS UPC. BARCELONA.

BARROS FROTA, A. y RAMOS SCHIFFER, S. (2001): *Manual de Conforto Térmico*. STUDIO NOBEL. SÃO PAULO.

KVISGAARD, B. (1997): *Thermal Comfort*. INNOVA AIR TECH INSTRUMENTS – UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA. MADRID.

GARCÍA, D. (2009): “Arquitectura Bioclimática” [en línea], <http://abioclimatica.blogspot.com/>, [consulta: Diciembre del 2009].

WALKER, I.; SHERMAN, M. y PERSILY, A. (2005): “Ventilation and Infiltration”. En OWEN, M. y KENNEDY, H. (editores): *2005ASHRAE Handbook Fundamentals*. ASHRAE. ATLANTA, pp. 27.15-27.16.

ENERGY PLUS. (2009): “*Getting Started with EnergyPlus*”. University of Illinois and University of California. USA.

ENERGY PLUS. (2009): “*EnergyPlus Engineering Reference*”. University of Illinois and University of California. USA.

[ <http://www.casasconfortables.net> ] (2009): “Información sobre Casas Bioclimáticas” [en línea], <http://www.casasconfortables.net/bioclimatica.htm>, [consulta: Diciembre del 2009].

BARRIONUEVO, R. y ESPINOZA, R. (2005): “Edificaciones Bioclimáticas en el Perú”. En GONÇALVES, H. (editores): *Los Edificios Bioclimáticos en los Países de Ibero América*. PROGRAMA CYTED – INETI. LISBOA, pp. 57-66.

GONÇALVES, H. (2005): “Edifícios bioclimáticos de construção social e edificios sociais em Portugal”. En GONÇALVES, H. (editores): *Los Edificios Bioclimáticos en los Países de Ibero América*. PROGRAMA CYTED – INETI. LISBOA, pp. 67-74.

DE SCHILLER S.; EVANS, M.; DELBENE, C.; LABEUR, A. y KOZAK, D. (2005): “Proyectos de bajo impacto y alta eficiencia energética”. En GONÇALVES, H. (editores): *Los Edificios Bioclimáticos en los Países de Ibero América*. PROGRAMA CYTED – INETI. LISBOA, pp. 85-96.

GRAHAM, P. (1995): *Development and Validation of the unvented Trombe wall model in Energy Plus*. Tesis de maestría dirigida por: PEDERSEN, C. y LIESEN, R. Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Illinois. (Inédita). Urbana-Illinois.

BRACK, M. y MENDIOLA, C. (2000): *Ecología del Perú*. EDITORIAL BRUÑO. LIMA

INCROPERA, F. y DEWITT, D. (1999): *Fundamentos de transferencia de calor*. PRENTICE HALL. MEXICO.

CHURCHILL, S. y CHU, H. (1975): *Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate*. USA.

ECOFACTORY (2009): “Diagrama de GIVONI” [en línea], <http://www.ecofactory.es/2008/10/diagrama-de-givoni.html>, [consulta: Diciembre del 2009].

MILIARIUM (2009): “Carta bioclimática de Olgyay” [en línea], <http://www.miliarium.com/Marcos/Busqueda.htm>, [consulta: Diciembre del 2009].

GRUPO PUCP (2009): “Tecnologías apropiadas contra el friaje en las zonas altoandinas” [en línea], <http://www.pucp.edu.pe/grupo/Friaje.htm>, [consulta: Diciembre del 2009].

GERES. (2009): “The association” [en línea], <http://www.geres.eu/en/top-about-us>, [consulta: Diciembre del 2009].

GERES. (2009): “[India – Himalaya] Energy efficiency and bioclimatic architec” [en línea], <http://www.geres.eu/en/housing-energy/17-inde-1000-batiments-passifs>, [consulta: Diciembre del 2009].

GERES. (2009): “Indian – Himalayas” [en línea], <http://www.geres.eu/images/projets/PSH-Indian-Himalayas.pdf>, [consulta: Diciembre del 2009].

CEYLAN, H. T. y G. E. MYERS (1980). *Long-time Solutions to Heat Conduction Transients with Time-Dependent Inputs*. ASME Journal of Heat Transfer, Volume 102, No. 1, pp. 115- 120.

HITTLE, D. C. (1979). *Calculating Building Heating and Cooling Loads Using the Frequency Response of Multilayered Slabs*, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, IL.

HITTLE, D. C., y BISHOP, R. (1983). *An Improved Root-Finding Procedure for Use in Calculating Transient Heat Flow Through Multilayered Slabs. International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, No. 11, pp. 1685-1693.

OUYANG, K., y F. HAGHIGHAT (1991). *A Procedure for Calculating Thermal Response Factors of Multi-layered Walls--State Space mMethod. Building and Environment*, Vol. 26, No. 2, pp. 173-177.

SEEM, J. E. (1987). *Modeling of Heat Transfer in Buildings*, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI.

STRAND, R. K. (1995). *Heat Source Transfer Functions and Their Application to Low Temperature Radiant Heating Systems*, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, IL.

TAYLOR, R. D., C.O. PEDERSEN, D.E. FISHER, R. J. LIESEN, L.K. LAWRIE. (1990). *Simultaneous Simulation of Buildings and Mechanical Systems in Heat Balance Based Energy Analysis Programs*, Proceedings of the 3rd International Conference on System Simulation in Buildings, Liege, Belgium, December 3-5, 1990.

TAYLOR, R.D., C.O. PEDERSEN, D.E. FISHER, R. J. LIESEN, L.K. LAWRIE. (1991). *Impact of Simultaneous Simulation of Buildings and Mechanical Systems in Heat Balance Based Energy Analysis Programs on System Response and Control*. Conference Proceedings IBPSA Building Simulation '91, Nice, France, August 20-22, 1991.

## ANEXOS

### A1. MARCO TEÓRICO

#### A1.1. Confort térmico

A lo largo de la sección anterior se mencionaron técnicas de arquitectura bioclimática con el objetivo de lograr ambientes térmicamente confortables; es decir, que las personas sientan confort térmico al interior. Esto nos lleva a formularnos la siguiente pregunta: ¿Qué es confort térmico? Algunas definiciones se mencionan a continuación.

*“Confort térmico es aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico.” (Kvisgaard, 1997).*

*“Una persona se encuentra en estado de “confort térmico” cuando permanece ignorante de las condiciones térmicas, cuando no hay malestar térmico, cuando puede hacer lo que quiera sin estorbo y sin esfuerzo debido a las condiciones de temperatura y humedad.” (Morillón, 2004).*

Estas definiciones no son fáciles de convertir en parámetros físicos; ya que la sensación de “confort térmico” depende de varios factores tales como: tipo de vestimenta, condiciones ambientales, tipo de actividad que se esté realizando y sobre todo de la persona. Por ejemplo, un puneño probablemente se sienta cómodo a una temperatura ambiente de 16°C; sin embargo, un mexicano sentirá mucho frío.

Otro ejemplo puede ser el siguiente. Un día frío y soleado de invierno, una persona vestida normal puede descansar en una habitación con calefacción, al tiempo que otra persona con ropa ligera puede estar haciendo deporte en el exterior. Ambas personas pueden sentirse en confort térmico aunque se encuentren en ambientes totalmente diferentes y realizando distintas actividades.

Cuando se evalúa un ambiente de trabajo o doméstico, además de la comodidad térmica deben considerarse otros factores: calidad del aire, niveles de luz y niveles de ruido; esto es importante ya que si una persona siente que el entorno de trabajo no es satisfactorio, su rendimiento laboral disminuirá inevitablemente, teniendo esto un gran impacto la calidad de su trabajo.



Figura A1. El tipo de actividad y las condiciones climáticas del ambiente determinan en gran medida la sensación de confort térmico de una persona, (Kvisgaard, 1 997).

En general, el hombre siempre ha deseado crear ambientes térmicamente cómodos; esto se ve reflejado en la arquitectura tradicional de todo el mundo, desde la historia antigua hasta el presente. Actualmente, la creación de este tipo de ambientes es uno de los parámetros más importantes que se consideran cuando se proyectan edificios.

#### A1.1.1. Generación de calor del cuerpo humano y nivel metabólico (MET)

El cuerpo humano produce la energía que necesita para mantenerse vivo y activo a partir del consumo de alimentos y oxígeno, los cuales, a lo largo de complejas reacciones químicas en el organismo se convierten en calor. Así pues, el cuerpo humano es un generador constante de calor.

Una persona sin hacer absolutamente nada y con un gasto energético al mínimo sólo para mantener su organismo vivo (metabolismo basal dado usualmente al dormir), genera entre 65 y 80 W de calor (esto varía según sexo, edad y superficie corporal); en comparación, una bombilla eléctrica incandescente de 60 W emite aproximadamente 55 W de calor.

El calor generado por una persona varía según el tipo de actividad que realice, por ej. un hombre de una complexión física normal descansando genera unos 115 W, caminando por una superficie plana a una rapidez entre 3,5 y 5,5 km/h genera entre 235 a 360 W, si acelera el paso a más de 7 km/h produce calor alrededor de 520 W. En un trabajo muy severo la producción de calor puede sobrepasar los 900 W, como es el caso de los deportistas de alto rendimiento que realizando una actividad muy intensa pueden alcanzar los 2000 W durante unos minutos, (Kvisgaard, 1997).

El metabolismo es el motor del cuerpo y la cantidad de energía producida por el metabolismo depende de la actividad muscular. La energía empleada para realizar actividad muscular durante trabajos físicos externos puede llegar a ser hasta un 25% de la energía generada en el metabolismo, el resto se pierde en forma de calor. Como ejemplo, una persona subiendo una montaña que genere un trabajo externo de 100 W (acumulado como energía potencial), puede

necesitar generar una energía metabólica de 500W, de los cuales 400W se disiparán en forma de calor.

El metabolismo se suele medir en “Met”, correspondiente al nivel de actividad de una persona sedentaria y equivale a una pérdida de calor de 58 W/m<sup>2</sup> de superficie corporal. Un adulto normal tiene una superficie de piel de 1.7 m<sup>2</sup>, de manera que una persona en reposo pierde aproximadamente 100 W. Nuestro metabolismo está al mínimo mientras dormidos (0.8 Met) y se incrementa al máximo durante actividades deportivas, pudiendo superar los 10 Met.

*Tabla A1. Calor cedido al ambiente (W) según la actividad desarrollada por el individuo. (Barros, 2001).*

<b>Actividad</b>	<b>Calor Metabólico (W)</b>	<b>Calor Sensible (W)</b>	<b>Calor latente (W)</b>
Durante el sueño (basal)	80	40	40
Sentado, en reposo	115	63	52
En pié, en reposo	120	63	57
Sentado, cosiendo a mano	130	65	65
Escritorio (actividad moderada)	140	65	75
En pié, trabajo leve	145	65	80
Datilografiando rápido	160	65	95
Lavando platos	175	65	110
Confeccionando calzados	190	65	125
Andando	220	75	145
Trabajo leve, en bancada	255	80	175
Garcon	290	95	195
Descendido la escalera	420	140	280
Serruchando madera	520	175	345
Nadando	580	-	-
Subiendo la escalera	1280	-	-
Esfuerzo máximo	870 a 1400	-	-

Tabla A2. Niveles metabólicos para distintas actividades. (Kvisgaard, 1997).

Niveles Metabólicos (M) de las siguientes Actividades	W/m <sup>2</sup>	Met	Niveles Metabólicos (M) de las siguientes Actividades	W/m <sup>2</sup>	Met
Acostado	46	0,8	De pie, lavando platos	145	2,5
Sentado relajado	58	1,0	Trabajo doméstico: rastrillando hojas sobre el césped	170	2,9
Trabajo de relojero	65	1,1	Trabajo doméstico: lavando a mano y planchando (120 - 220 W/m <sup>2</sup> )	170	2,9
De pié, relajado	70	1,2	Construcción, usando un vibrador neumático	175	3,0
Actividad sedentaria: oficina, vivienda, escuela	70	1,2	Construcción: encofrando	180	3,1
Conduciendo un automóvil	80	1,4	Caminando en horizontal 5 km/h	200	3,4
Profesión gráfica, encuadernador	85	1,5	Forestal: cortando monte con una sierra mecánica	205	3,5
De pie, actividad ligera: comprando, industria ligera	93	1,6	Agricultura: arando con un tiro de animales	235	4,0
Profesor	95	1,6	Construcción: cargando una carretilla con piedras	275	4,7
Trabajo doméstico: afeitarse, lavarse, vestirse	100	1,7	Deporte: patinando sobre hielo 18 km/h	360	6,2
Caminando horizontal 2 km/h	110	1,9	Agricultura: cavando con una pala (24 golpes/minuto)	380	6,5
De pié, actividad media: vendedor, trabajo doméstico	116	2,0	Deporte: esquiando en horizontal 9 km/h	405	7,0
Construcción, colocando bloques de 15 kg	125	2,1	Forestal: trabajando con un hacha de 2 Kg (33 golpes/minuto)	500	8,6
			Deporte: corriendo a 15 km/h	550	9,5

### A1.1.2. Autorregulación del cuerpo humano

El hombre tiene un sistema regulador de temperatura muy efectivo, que garantiza que la temperatura del núcleo del cuerpo se mantenga a 37°C aproximadamente. No obstante, el intervalo de supervivencia puede extenderse, en algunos casos, desde los 28 °C hasta los 44 °C de temperatura interna (generalmente con daños importantes en el organismo); la temperatura interna considerada normal, en la que no deben producirse afectaciones, oscila alrededor de los 37,6 °C, dentro de un intervalo de 36 °C a 38 °C; no obstante, durante actividades físicas intensas puede llegar a alcanzar los 40 °C, lo cual, en circunstancias específicas, es necesario para lograr el rendimiento adecuado.

El sistema de control que regula la temperatura del cuerpo es complejo y aún no se comprende del todo. Sin embargo, se conoce que los dos sistemas más importantes de sensores para realizar este control están localizados en la piel y en el hipotálamo, estos sensores envían impulsos eléctricos al cerebro. El hipotálamo tiene un sensor de calor que inicia la función de enfriamiento del cuerpo cuando la temperatura del núcleo del cuerpo sobrepasa los 37° C. Los sensores de la piel son sensores de frío que inician las defensas corporales contra el enfriamiento cuando la temperatura de la piel cae por debajo de 34°C.

Cuando el cuerpo empieza a calentarse demasiado, se inician dos procesos: primero se dilatan los vasos sanguíneos, incrementando el flujo de sangre por la piel, y a continuación uno empieza a sudar. El sudor es un mecanismo efectivo de enfriamiento, porque la energía requerida para evaporar el sudor es tomada de la piel. Bastan unas pocas décimas de grado de incremento de la temperatura del núcleo del cuerpo para estimular una producción de sudor que puede cuadruplicar la pérdida de calor del cuerpo.

Si el cuerpo empieza a enfriarse demasiado, la primera reacción es la vaso-constricción de los conductos sanguíneos, reduciendo el flujo de sangre por la piel. La segunda reacción es incrementar la producción interna de calor mediante la estimulación de los músculos pudiendo causar temblores. Este sistema también es muy efectivo y puede incrementar la producción de calor corporal bruscamente.

Cuando la temperatura de la piel baja de los 34°C, nuestros sensores de frío empiezan a enviar impulsos al cerebro; y si la temperatura continúa bajando los impulsos se incrementan en número. De forma similar, el sensor de calor en el hipotálamo envía impulsos cuando la temperatura excede de 37°C y cuanto más se incremente la temperatura, aumenta el número de impulsos. El cerebro interpreta estas señales como una suma de impulsos positivos y negativos que se anulan entre sí. Si las señales de ambos signos son de la misma magnitud se sentirá térmicamente neutro (estado de neutralidad térmica), si no, se sentirá demasiado caluroso o demasiado frío (Kvisgaard, 1997).

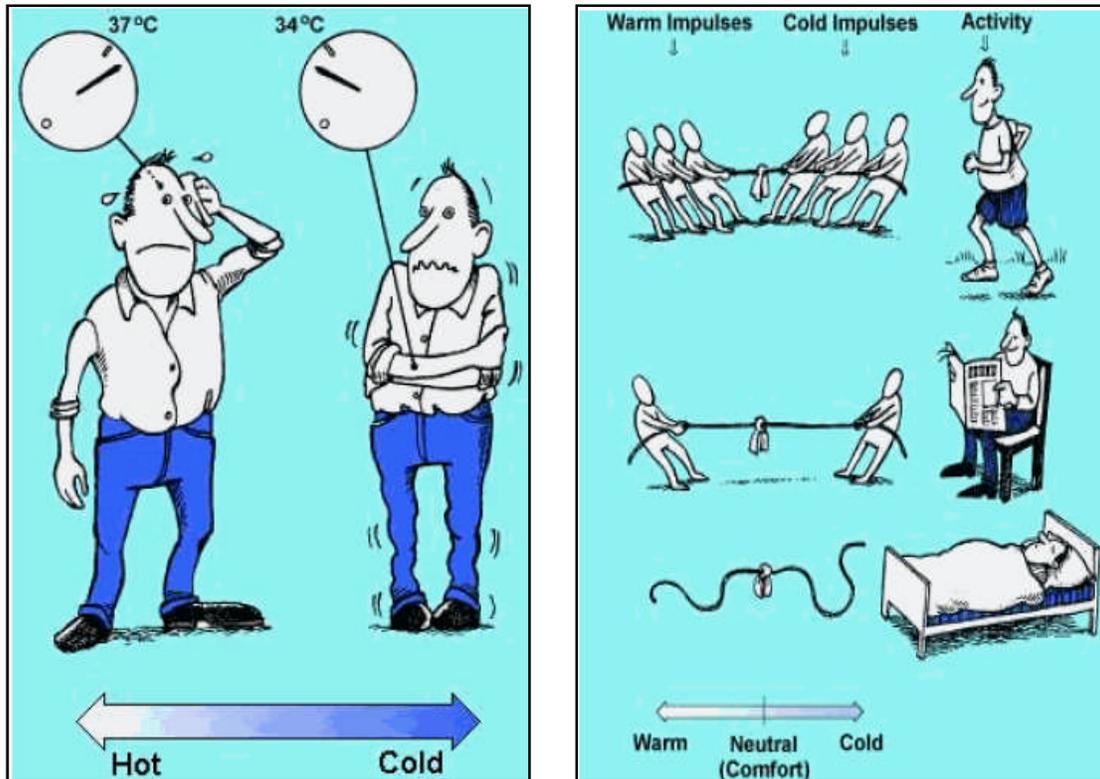


Figura A2. El sistema de control para autoregular la temperatura del cuerpo actúa cuando este se calienta o enfría más allá de lo permitido. Los sensores de frío y calor de nuestro cuerpo envían impulsos a nuestro cerebro en todo momento, (Kvisgaard, 1997).

### A1.1.3. Condiciones para lograr confort térmico

Dos condiciones deben ser cumplidas para lograr el confort térmico. La primera es que la combinación actual de temperatura de piel y temperaturas del núcleo del cuerpo proporcione una sensación de neutralidad térmica. La segunda es el equilibrio del balance de energía del cuerpo: el calor producido por el metabolismo debería ser igual a la cantidad de calor disipada por el cuerpo.

#### A1.1.4. Estimación del nivel de ropa (CLO)

La ropa reduce la pérdida de calor del cuerpo; por lo tanto, esta se clasifica según su valor de aislamiento térmico. La unidad normalmente usada para medir el aislamiento de ropa es la unidad Clo, aunque también se utiliza la unidad más técnica de  $m^2K/W$  ( $1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ m}^2K/W$ ).

La escala Clo se ha diseñado para que una persona desnuda tenga un valor de 0 Clo, y alguien vestido con un traje típico de negocio tenga un de valor de 1 Clo. El valor Clo total puede calcularse si se conoce la vestimenta de las personas y los valores Clo de cada una de las prendas, sumando simplemente los valores de cada una. El valor Clo obtenido mediante este cálculo suele tener una exactitud suficiente.

Cuando se calcula los valores Clo es importante recordar que las butacas tapizadas, los asientos de automóvil y las camas también reducen la pérdida de calor del cuerpo y por lo tanto, estos deben incluirse en el cálculo total.

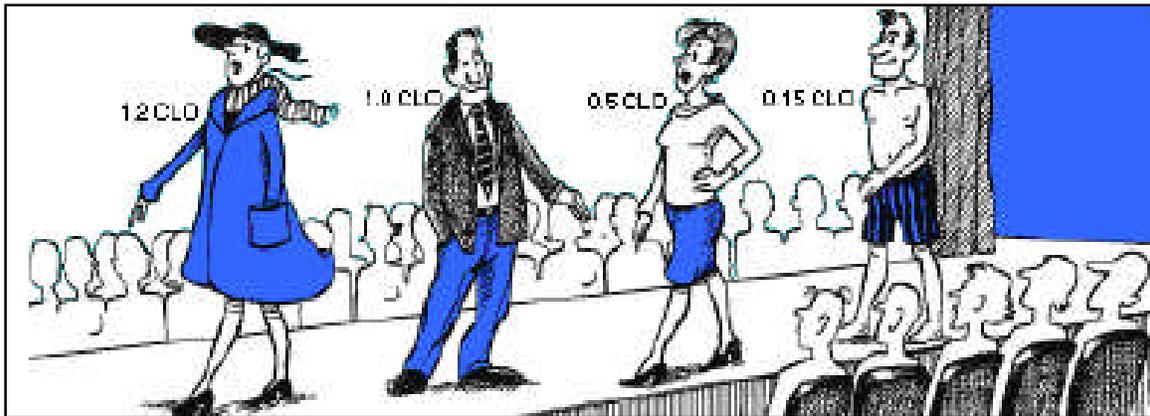


Figura A3. Aislamiento térmico asociado a la vestimenta, (Kvisgaard, 1 997).

Tabla A3. Aislamiento térmico de prendas de vestir. (Kvisgaard, 1997).

<b>Prendas de vestir</b>		<b>Clo</b>	<b>m<sup>2</sup>K/W</b>			<b>Clo</b>	<b>m<sup>2</sup>K/W</b>
<b>Ropa interior inferior</b>	Medias	0,02	0,003	<b>Chaqueta</b>	De vestido	0,13	0,020
	Panty	0,03	0,005		Chaqueta ligera de verano	0,25	0,039
	Bragas y calzoncillos	0,04	0,006		Chaqueta	0,35	0,054
	Calzoncillo 1/2 pierna de lana	0,06	0,009		Anorak	0,3	0,047
	Calzoncillo pierna entera	0,1	0,016	<b>Abrigos</b>	Abrigo	0,6	0,093
<b>Ropa interior superior</b>	Sujetador	0,01	0,002		Gabardina	0,55	0,085
	Camiseta sin mangas	0,06	0,009		Parka	0,7	0,109
	Camiseta manga corta	0,09	0,014		Sobreabrigo multicomponente	0,52	0,081
	Camiseta manga larga	0,12	0,019	<b>Calzado</b>	Calcetines	0,02	0,003
	Camiseta térmica nylon	0,14	0,022		Calcetines gruesos tobillos	0,05	0,008
<b>Camisas</b>	Top de tubo	0,06	0,009		Calcetines gruesos largos	0,1	0,016
	Camisa manga corta	0,09	0,014		Zapatillas, rellena de peluche	0,03	0,005
	Blusa ligera, manga larga	0,15	0,023		Zapato suela fina	0,02	0,003
	Camisa ligera, manga larga	0,2	0,031		Zapato suela grasa	0,04	0,006
	Camisa normal, manga larga	0,25	0,039		Botas	0,1	0,016
	Camisa franela, manga larga	0,3	0,047		Guantes	0,05	0,008
	Blusa larga de cuello cisne	0,34	0,053				

Tabla A4.- Aislamiento térmico de prendas de vestir. (Kvisgaard, 1997).

<b>Prendas de vestir</b>		<b>Clo</b>	<b>m<sup>2</sup>K/W</b>			<b>Clo</b>	<b>m<sup>2</sup>K/W</b>
<b>Pantalones</b>	Pantalones cortos	0,06	0,009	<b>Falda, vestido</b>	Falda ligera, 15 cm sobre rodilla	0,1	0,016
	Pantalones cortos de excursión	0,11	0,017		Falda ligera, 15 cm bajo rodilla	0,18	0,028
	Pantalones ligeros	0,2	0,031		Falda gruesa hasta la rodilla	0,25	0,039
	Pantalones normales	0,25	0,039		Vestido ligero sin mangas	0,25	0,039
	Pantalones de franela	0,28	0,043		Vestido de invierno manga larga	0,4	0,062
	Pantalones de chandal	0,28	0,043	<b>Ropa de cama</b>	Camisón largo de manga larga	0,3	0,047
<b>Mono</b>	De diario, con cinturón	0,49	0,076		Camisón corto de tirantes	0,15	0,023
	De trabajo	0,5	0,078		Camisón de hospital	0,31	0,048
<b>De alto aislamiento</b>	Multicomponente, relleno	1,03	0,160		Pijama de mangas y pantalones largos	0,5	0,078
	Con forro de peluche	1,13	0,175		Body de dormir con pies	0,72	0,112
<b>Suéter</b>	Chaleco	0,12	0,019	<b>Batas</b>	Pantalón corto	0,1	0,016
	Suéter fino	0,2	0,031		Bata larga acolchada de manga larga	0,53	0,082
	Suéter fino cuello de cisne	0,26	0,040	<b>Asientos</b>	Bata corta acolchada de manga larga	0,41	0,064
	Suéter normal	0,28	0,043		Madera o metal	0	0,000
	Suéter grueso	0,35	0,054		Tapizado acolchado, con cojin	0,1	0,016
	Suéter grueso cuello de cisne	0,37	0,057		Sillón	0,2	0,031

### A1.1.5. Balance térmico entre la persona y el medio

Una de las condiciones para lograr confort térmico es que el calor producido por el metabolismo debe ser igual a la cantidad de calor disipada por el cuerpo. El concepto de intercambio térmico se puede analizar como un estado de cuentas en que el saldo final debe ser cero para que todo marche bien, entonces se dice que el balance térmico entre el individuo y su entorno está en equilibrio. La persona, como todo cuerpo, constantemente emite calor hacia el medio y a su vez, constantemente es receptor del calor que emiten los demás cuerpos.

El hombre gana calor principalmente por las siguientes vías:

- Por su metabolismo (M), determinado por su metabolismo basal y la actividad que realice.
- Por radiación de calor (R), que recibe de los cuerpos de su entorno.
- Por convección (C), al recibir calor del aire (o agua) que está en contacto con él.
- Por la respiración (Res), al inspirar aire caliente cuya temperatura esté por encima de su temperatura corporal.
- Por conducción (Cd), al recibir calor de los cuerpos sólidos que están en contacto directo con él.

A su vez, el hombre pierde calor principalmente por las siguientes vías:

- Por radiación de calor (R), que emite hacia los cuerpos de su entorno.
- Por convección (C), al entregar calor al aire que está en contacto con él.
- Por la respiración (Res), al espirar el aire durante la respiración y el jadeo.
- Por trabajo externo (W), al realizar una actividad con un trabajo externo positivo.
- Por evaporación del sudor (E), al entregarle calor al sudor para que éste pueda evaporarse.
- Por conducción (Cd), al entregar calor a los cuerpos sólidos que están en contacto directo con él.

$$- \pm \pm \pm \pm - = \quad (A1)$$

Donde A sería el saldo final; es decir, el calor acumulado (si  $A > 0$ ) o perdido (si  $A < 0$ ) en el organismo como consecuencia de un desequilibrio; y si  $A = 0$  significa que existe equilibrio térmico, (Mondelo, 1999).

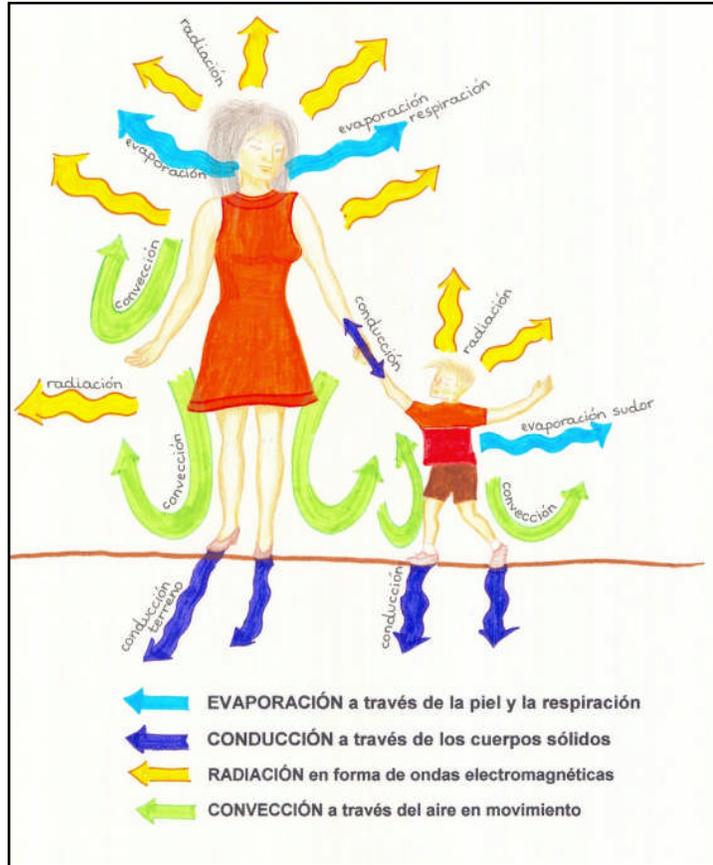


Figura A4. El cuerpo humano gana y pierde calor a través de distintas vías, variando la cantidad según el tipo de actividad realizada, (García, 2 009).

En la práctica se pueden despreciar los intercambios por respiración y por conducción y, salvo determinadas situaciones el trabajo externo, teniendo en cuenta que en la mayor parte de las actividades su valor es bajo o nulo. De manera que la ecuación práctica de balance térmico quedaría:

$$\pm \pm - = \quad (A2)$$

Por lo tanto, la ecuación de balance térmico puede adoptar una de estas cuatro formas que, según la situación, significan:

- $\pm \pm = 0; (\quad = 0),$
- $\pm \pm - = 0,$
- $\pm \pm - > 0,$  í
- $\pm \pm < 0,$  í            í

El hombre no puede sentir la temperatura del lugar sino el calor que pierde su cuerpo. Los parámetros que se deben medir son aquellos que afectan a la pérdida de energía. Las seis variables que definen la interrelación entre la persona y el ambiente térmico son las siguientes:

- La temperatura del aire
- La temperatura radiante
- La humedad del aire
- La velocidad del aire
- La actividad desarrollada
- La vestimenta

Siendo las cuatro primeras aportadas por el entorno y las dos segundas por la persona.

### A1.1.6. Temperatura radiante media

La temperatura radiante media (TRM) se define como aquella que se podría tomar como temperatura uniforme de las superficies que rodean al cuerpo, y que daría un mismo intercambio por radiación. Se estima mediante las temperaturas de las distintas superficies que lo rodean, ponderadas en función del factor de visión de cada una:

$$T_{rm} = \left[ \sum_{i=1}^n F_{vi} (T_i + 273) + \dots + \sum_{j=1}^m F_{vj} (T_j + 273) \right] \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{vi} + \sum_{j=1}^m F_{vj}} - 273 \quad (A3)$$

en donde

$T_i$  : temperatura de la superficie  $i$ , (°C)

$F_{vi}$  : factor de visión de la superficie  $i$ ,  $h$  é

Por lo tanto la temperatura media radiante es función de la postura de la persona, y de su posición en el entorno.

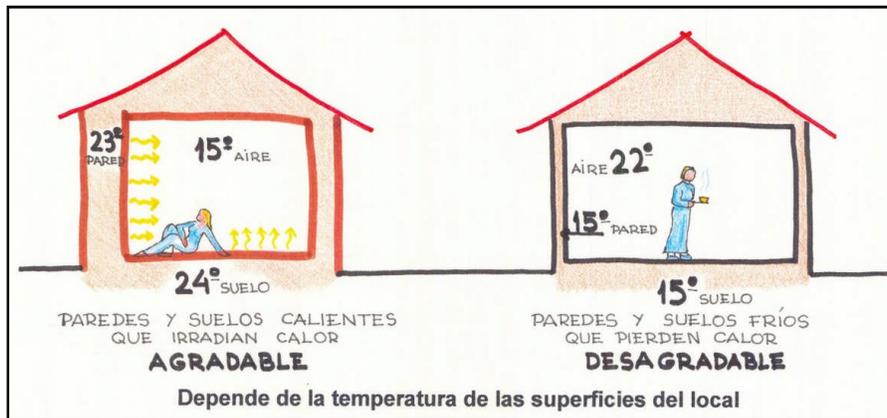


Figura A5. Influencia de la temperatura de las superficies en el confort térmico, (García, 2009).

### A1.1.7. Índices de confort y cartas bioclimáticas

Muchas veces por razones técnicas o económicas, no es posible un estado microclimático que dé lugar al confort térmico. Por ejemplo, en muchas ocasiones, las situaciones en las que los trabajadores manifiestan su disconformidad con el ambiente térmico no son suficientemente agresivas como para dar lugar a daños para la salud; sin embargo, ello no impide que los parámetros térmicos sean capaces de generar una sensación de disconfort que contribuye de forma notable a la reducción de la eficiencia del operario, y a un empobrecimiento de la productividad y de la calidad del sistema productivo.

Como ha podido ser visto en las secciones anteriores, las condiciones de confort térmico son funciones de la actividad desarrollada por el individuo, de su vestimenta y de las variables ambientales que proporcionan las transferencias de calor entre el cuerpo y el ambiente. Así también, deben ser consideradas otras variables como sexo, edad, biotipo, hábitos alimentarios, etc. **Convencionalmente se asume que en un ambiente una persona en reposo o actividad ligera sentirá confort térmico a una temperatura y H.R. del aire de 22 °C y 50% respectivamente; no obstante, como se verá más adelante, estos valores no son aplicables en todos los contextos.**

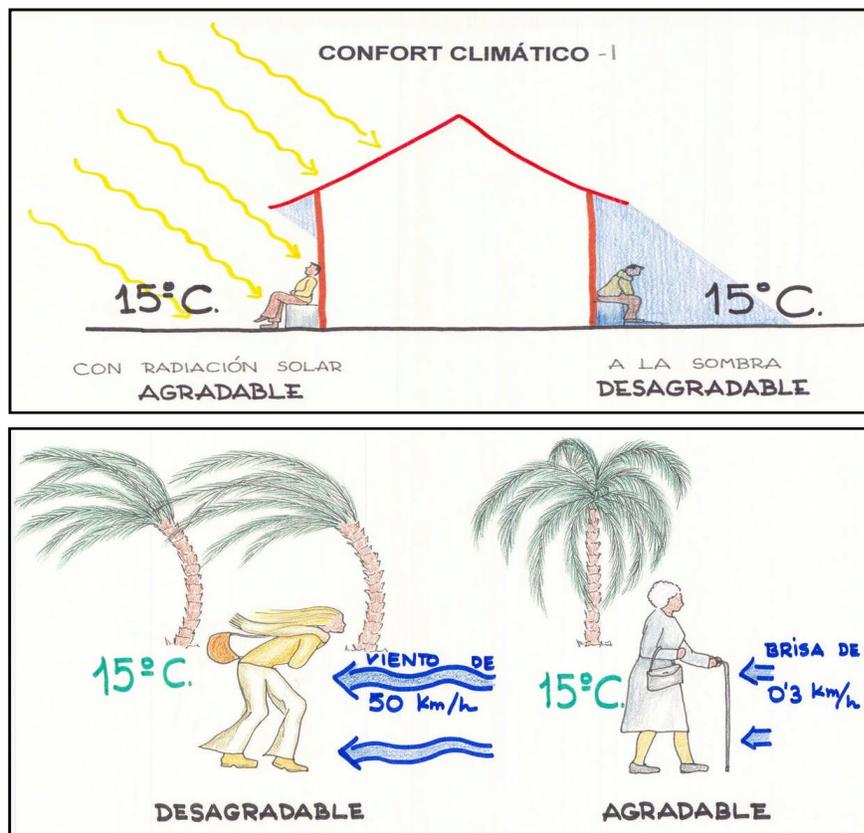


Figura A6. La sensación de confort térmico depende de condiciones biofísicas, fisiológicas y subjetivas, (García, 2 009).

Los índices de confort procuran englobar, en un parámetro, los efectos de las variables ya mencionadas. Y, en general, esos índices son desarrollados fijando un tipo de actividad y la vestimenta utilizada por el individuo para, a partir de allí, relacionar las variables de ambiente y reunir, sobre la forma de cartas o nomogramas, las diversas condiciones que proporcionan respuestas iguales por parte de los individuos. Los índices de confort fueron desarrollados con base en diferentes aspectos del confort y pueden ser clasificados como sigue:

- Índices biofísicos; que se basan en las transferencias de calor entre el cuerpo y el ambiente, correlacionando los elementos de confort con las transferencias de calor.
- Índices fisiológicos; que se basan en las reacciones fisiológicas originadas por condiciones conocidas de temperatura seca de aire, temperatura radiante media, humedad y velocidad de aire.
- Índices subjetivos; que se basan en las sensaciones subjetivas de confort experimentadas en condiciones en que los elementos de confort térmico varían.

La escala de uno u otro tipo de índice de confort debe estar relacionada con las condiciones ambientales, con la actividad desarrollada por el individuo, por la mayor o menor importancia de uno u otro aspecto de confort. Hay condiciones termo-higrométricas que pueden, por algún tiempo, ser consideradas como de confort en términos de sensación y provocar disturbios fisiológicos al fin de ese tiempo. Es el caso, por ejemplo, de individuos expuestos a condiciones de bajo contenido de humedad y que no perciben que están transpirando porque el sudor es evaporado rápidamente, al no tomar líquido en cantidades suficientes se deshidratan.

Se define como “zona de confort” al intervalo de temperaturas y humedades en las cuales el humano presenta el mínimo esfuerzo para disipar el calor que genera. A continuación se mencionan algunos de los índices de confort más difundidos (Mondelo, 1999).

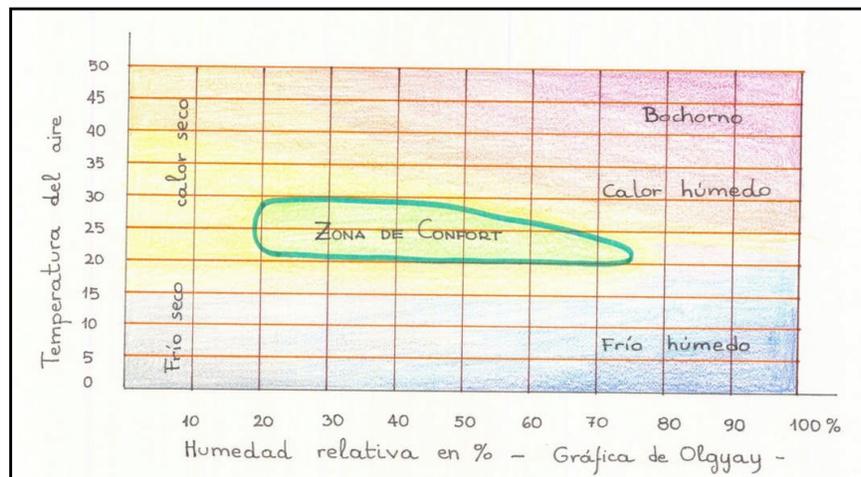


Figura A7. Zona de confort térmico definida en un diagrama psicrométrico. La ubicación de la zona de confort variará dependiendo de la persona (por ej. entre un peruano y un mexicano), (García, 2 009).

### A1.1.7.1. Auliciems

Este índice se resume en la siguiente relación, donde: (Morillón, 2004)

$$= 17.6 + 0.31 \times \quad (A4)$$

: , é  
:

### A1.1.7.2. Carta bioclimática de Olgay

La carta bioclimática de Olgay distingue la influencia de cuatro importantes variables del entorno: temperatura del aire seco, humedad relativa, radiación y movimiento del aire; e indica también su interacción. Esto permite determinar una zona de confort dentro de la carta. Además, para regiones en la carta fuera de la zona de confort, se mencionan recomendaciones asociadas a radiación incidente y velocidad de aire que lograrían, pese a encontrarse a una temperatura y humedad fuera de la zona de confort, tener una sensación de comodidad.

Esta carta consiste en un diagrama de condiciones básicas donde el eje de las abscisas representa la humedad relativa y el de las coordenadas la temperatura. Dentro del diagrama se localiza una zona denominada de confort en la que los valores de temperatura-humedad infieren al cuerpo humano una sensación térmica agradable.

Se basa en unas condiciones muy concretas, para una persona con actividad ligera (paseando), vestida con ropa de entretiempo (1 clo), sin viento y a la sombra.

En la figura A8, aparece en gris la zona que corresponde al confort. Esta zona está limitada por la temperatura del aire entre los 21°C y los 27°C y la humedad relativa entre 20% y 75%, con una zona de exclusión para el aire demasiado cálido y húmedo (sudor). Además, el gráfico muestra:

- Las sensaciones fisiológicas de las zonas periféricas
- Los límites de la actividad o el riesgo en función de las condiciones de calor y humedad
- La tolerancia a las bajas temperaturas cuando aumenta el arropamiento (en clo).

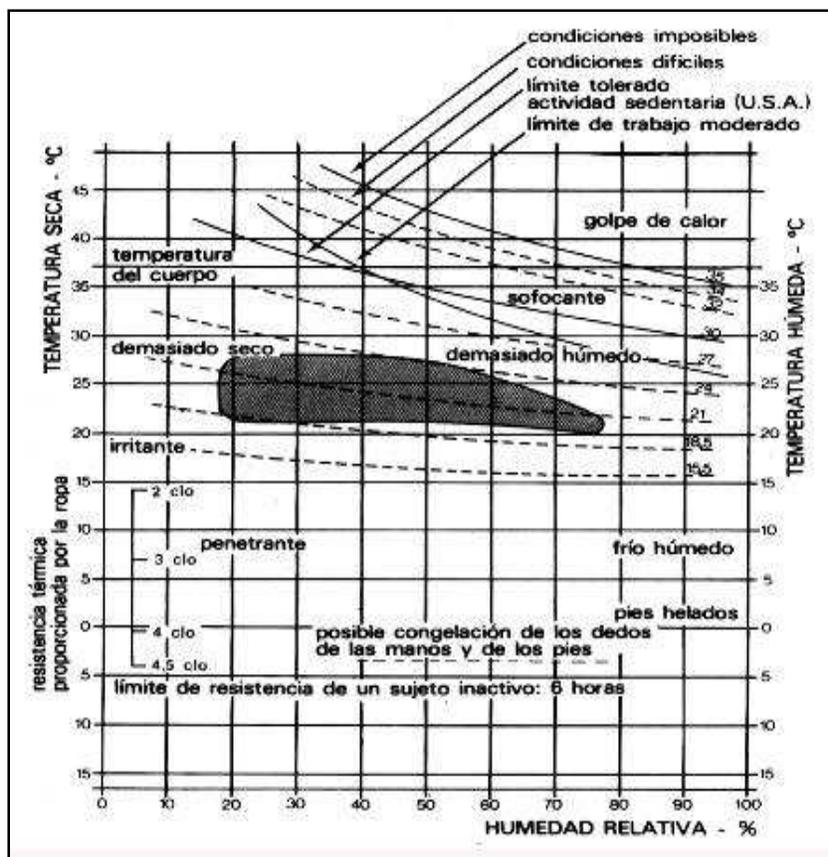


Figura A8. Carta bioclimática de Olgay, se muestra la zona de confort en gris y las sensaciones fisiológicas y tolerancias alrededor de esta zona, (Millarium, 2 009).

En la figura A9 se muestra el desplazamiento de la zona de confort cuando se aplican medidas correctoras del ambiente:

- Aumento de radiación incidente o soleamiento ( $W$  absorbidos) contra el frío.
- Aumento de la velocidad del viento (m/s) contra el exceso de calor y humedad.
- Evaporación adiabática (g agua/Kg aire) contra el exceso de calor y sequedad.

Es interesante para el estudio del ambiente exterior o clima, ya que se le puede incorporar los datos de temperatura y humedad del clima de una localidad, en diferentes meses y horas del día. También es un indicativo de las medidas de modificación microclimáticas para corregir situaciones de incomodidad térmica al exterior.

El método en sí ha recibido numerosas críticas cuando se ha querido aplicar para evaluar condiciones ambientales interiores, ya que no permite evaluar en detalle el nivel de comodidad ni la influencia de parámetros personales como la actividad, el arropamiento o la temperatura radiante media de los cerramientos, tal y como se describen en otros métodos más modernos (Millarium, 2 009).

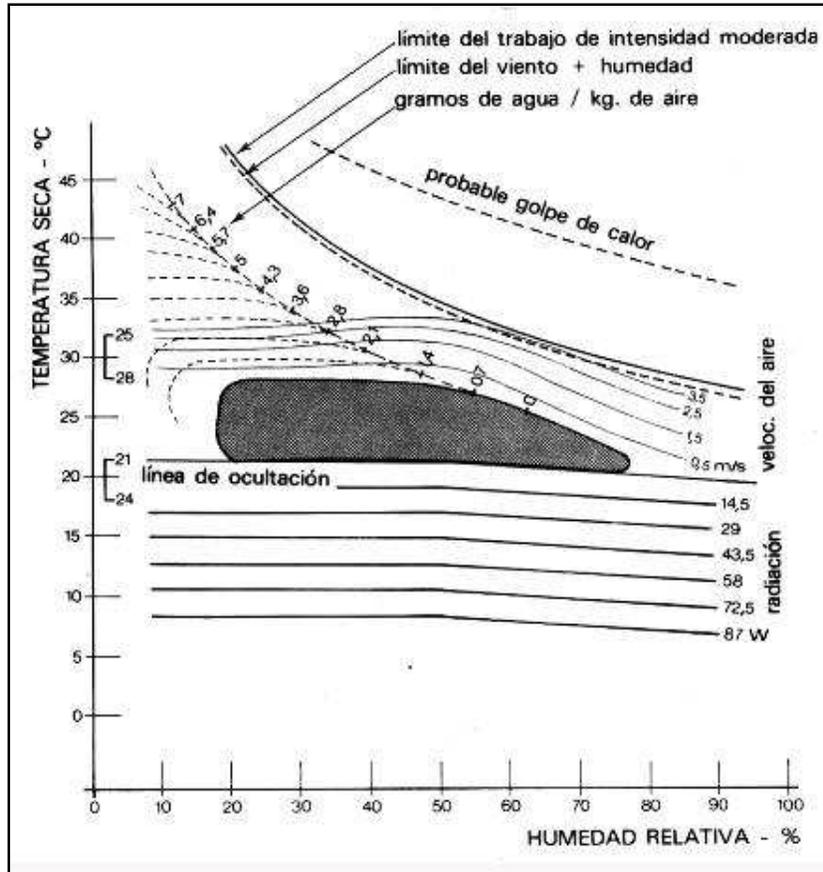


Figura A9. Carta bioclimática de Olgay, se muestra el desplazamiento de la zona de confort al aplicar medidas correctivas al ambiente, (Millarium, 2 009).

### A1.1.7.3. Carta bioclimática de Givoni

Este método se aplica para obtener condiciones de bienestar térmico en edificaciones, definiendo una zona de confort y planteando estrategias necesarias para que se pueda llegar a esa zona, vía dispositivos tales como: masa térmica, viento, enfriamiento evaporativo, calor radiante, humidificación, etc. La carta bioclimática de Givoni es una herramienta muy sencilla para averiguar de manera aproximada cuales son las situaciones climáticas de un lugar concreto a lo largo del año y saber qué tipo de estrategias deben tenerse en cuenta para proyectar un edificio (figura A10). Esta carta es un diagrama psicrométrico que utiliza los valores de temperatura y humedad media de cada mes. Con estos valores se obtienen 12 líneas que representan el rango de variación entre los estados máximos y mínimos medios de cada uno. Obteniéndose lo mostrado en la figura A11.

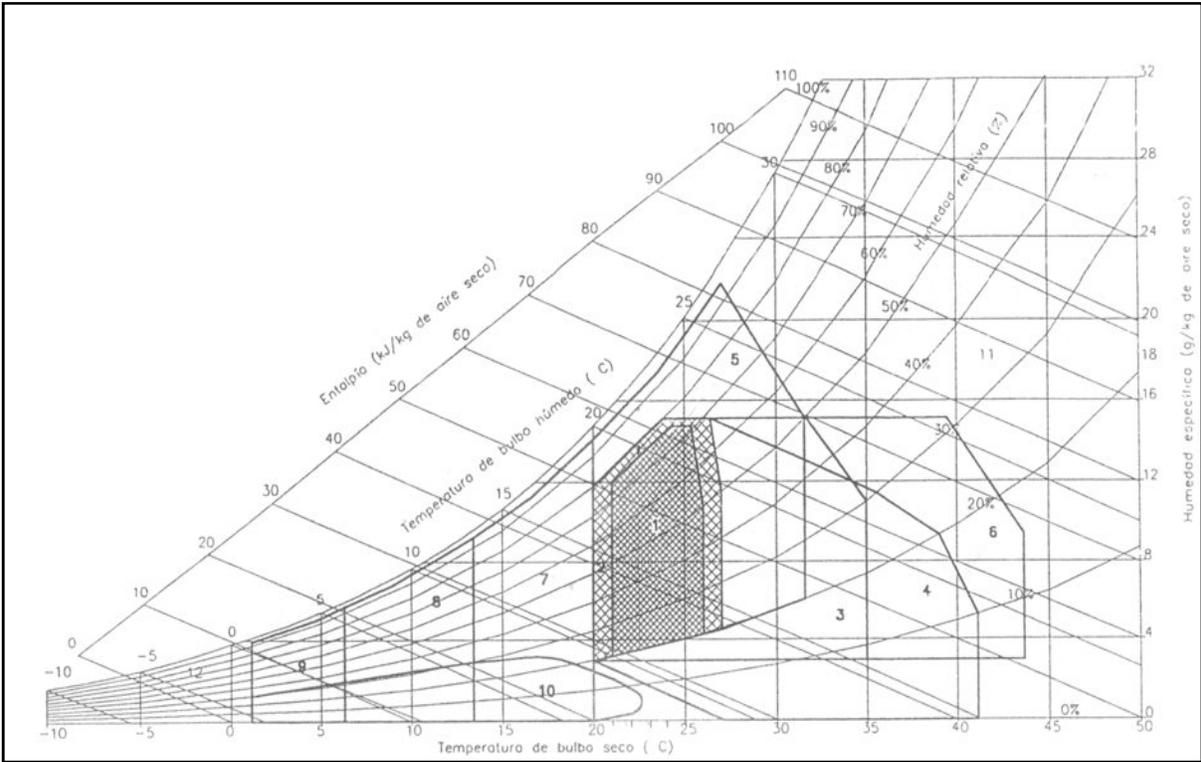


Figura A10. Carta bioclimática de Givoni, (Ecofactory, 2 009).

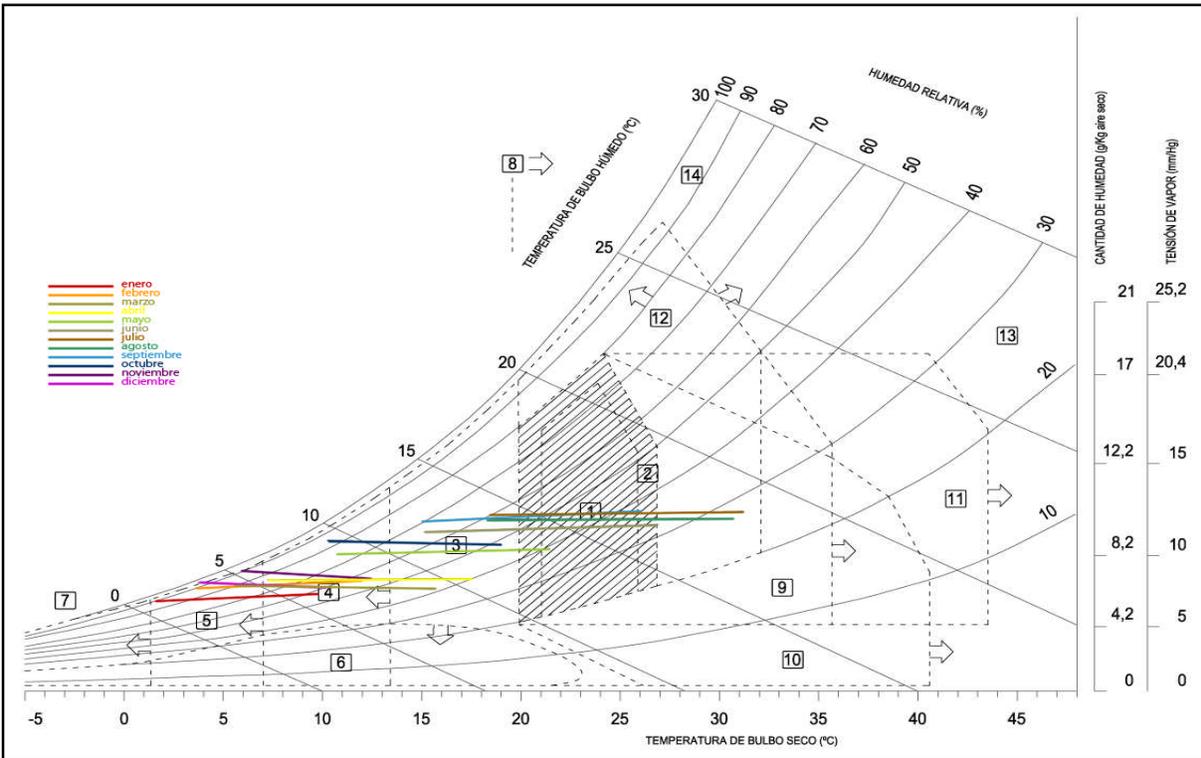


Figura A11. Carta bioclimática de Givoni. Se muestran las líneas de rango de variación mensual de temperatura y humedad, (Ecofactory, 2 009).

En el ejemplo de la figura A11 se ven representados cada mes del año con una línea, cuyos extremos corresponden a los valores máximos y mínimos medios de temperatura y humedad relativa. También vemos que el diagrama está dividido en varias zonas, cada una con un número. Estas zonas corresponden a áreas en las que se dan unos condicionantes climáticos similares, que pueden ser agrupados dentro de una misma categoría para la cual existe una solución bioclimática a resolver. Éstas son las categorías:

- 1 - Zona de confort
- 2 - Zona de confort permisible
- 3 - Calefacción por ganancias internas
- 4 - Calefacción solar pasiva
- 5 - Calefacción solar activa
- 6 - Humidificación
- 7 - Calefacción convencional
- 8 - Protección solar
- 9 - Refrigeración por alta masa térmica
- 10 - Enfriamiento por evaporación
- 11 - Refrigeración por alta masa térmica con ventilación nocturna.
- 12 - Refrigeración por ventilación natural y mecánica
- 13 - Aire acondicionado
- 14 - Deshumidificación convencional

Aplicado al ejemplo, los meses de invierno, sobre todo, y parte del inicio de primavera y final de otoño ocupan las zonas 4 y 5, por lo que, a la hora de diseñar un edificio, podremos resolver las necesidades de calor con calefacción solar pasiva y activa. En los meses de julio y agosto, con un sistema de refrigeración por alta masa térmica podríamos resolver las necesidades de confort climático. El resto del año, las ganancias internas podrían servir para mantener un buen clima interior.

Como decíamos al principio, este diagrama es una herramienta que nos da una idea general del clima de un lugar, y un primer acercamiento a qué debería ofrecer un edificio a nivel bioclimático, (Ecofactory, 2009).

#### A1.1.7.4. Método de Fanger, la escala PMV Y PPD

Como ya se mencionó, confort térmico puede definirse como la manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción con el ambiente térmico existente; no obstante, debido a la variabilidad psicofisiológica es prácticamente imposible conseguir que en un colectivo de personas, cualesquiera que sean las condiciones ambientales de referencia, la totalidad de las mismas manifiesten sentirse confortables en una situación microclimática dada.

Diferentes estudios han demostrado que en todo grupo de personas existe, al menos, un 5% que muestran estar disconformes con las condiciones de confort preestablecidas; obviamente si las condiciones ambientales son más desfavorables, este porcentaje puede incrementarse hasta que alcance a la totalidad de la población.

De los métodos existentes para la valoración del confort térmico uno de los más completos, prácticos y operativos es el de Fanger, que aparece en su libro *Thermal Comfort* (1973). Este método ha sido recogido por la norma ISO 7730 y consigue integrar todos los factores que determinan el confort (Kvisgaard, 1997).

Si la comodidad térmica en un lugar de trabajo no es perfecta. ¿Qué lejos se está de ella? ¿Entre que límites se debe mantener la temperatura y humedad para obtener un grado de comodidad térmica razonable?

La respuesta a estas preguntas se puede obtener mediante el índice PMV (Predicted Mean Vote), también conocido como Índice de Valor Medio (IVM). El índice PMV predice el valor medio de la sensación subjetiva de un grupo de personas en un ambiente determinado.

La escala del PMV tiene un rango de sensación térmica de 7 puntos, desde - 3 (muy frío) a +3 (muy caluroso), donde el 0 representa una sensación térmica neutra.

Aunque el índice PMV sea 0, todavía habrá algunos individuos que estén insatisfechos con el nivel de temperatura, a pesar que todos ellos tengan una vestimenta y un nivel de actividad similar, esto porque la evaluación de comodidad difiere ligeramente entre personas.

A partir de la definición de la escala del PMV, Fanger realizó encuestas de sensación térmica a 1300 sujetos, ubicándolos en cámaras climáticas donde se podía controlar la temperatura, humedad y velocidad del aire, temperatura radiante media; y además, registrando información sobre el aislamiento de la ropa usada, el metabolismo y las actividades realizadas (trabajo) por las personas. Todos estos parámetros registrados (que se identifican también en la ecuación de balance de calor del cuerpo humano) junto con las encuestas del PMV realizadas, permitieron a Fanger hacer una extrapolación de datos y obtener una ecuación del PMV que depende de todos los parámetros registrados; a continuación se muestra la ecuación obtenida por Fanger.

El PMV que manifiesta un colectivo (por facilidad de tratamiento estadístico el tamaño de muestra no debe ser menor a 30), puede hallarse mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & (0.303 \cdot t_{\text{a}} + 0.028) \{ (t_{\text{r}} - t_{\text{a}}) - 3.05 \cdot 10^{-4} [5733 - 6.99(t_{\text{r}} - t_{\text{a}}) - \\
 & - 0.42[(t_{\text{r}} - t_{\text{a}}) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-4} (5867 - t_{\text{r}}) - 0.0014 (34 - t_{\text{a}}) \\
 & - 3.96 \cdot 10^{-4} [(t_{\text{r}} + 273) - (t_{\text{a}} + 273)] - h (t_{\text{r}} - t_{\text{a}}) \}
 \end{aligned}
 \tag{A5}$$

donde

$$= 35.7 - 0.028(\dots) - 0.155 [3.96 \cdot 10 \{(\dots + 273) - (\dots + 273)\} + h(\dots)] \quad (2.17)$$

$$h = 2.38(\dots) \cdot 2.38(\dots) \cdot > 12.1 \quad (2.18)$$

$$h = 12.1 \cdot 2.38(\dots) \cdot < 12.1 \quad (2.19)$$

$$= 1.00 + 0.2 < 0.5 \quad (2.20)$$

$$= 1.05 + 0.1 > 0.5 \quad (2.21)$$

siendo

- :í ó
- : , ( )
- : , í , ( )
- : é , ( )
- : ó á á
- : , (° )
- : , (° )
- : , ( / )
- : ó , ( )
- h : ó , [ / ( ) ]
- : , (° )

(Mondelo, 1999)

Para predecir cuánta gente está insatisfecha en un ambiente térmico determinado se introdujo el índice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), el cual fue obtenido por Fanger de la mano con el PMV. En el índice PPD la gente que vota - 3, - 2, +2, +3 en la escala PMV se considera térmicamente insatisfecha. Algo a notar es que en la curva que muestra la relación entre PMV y PPD siempre habrá como mínimo un 5% de personas insatisfechas (Mondelo, 1999).

$$= 100 - 95 (\dots) \quad (A6)$$

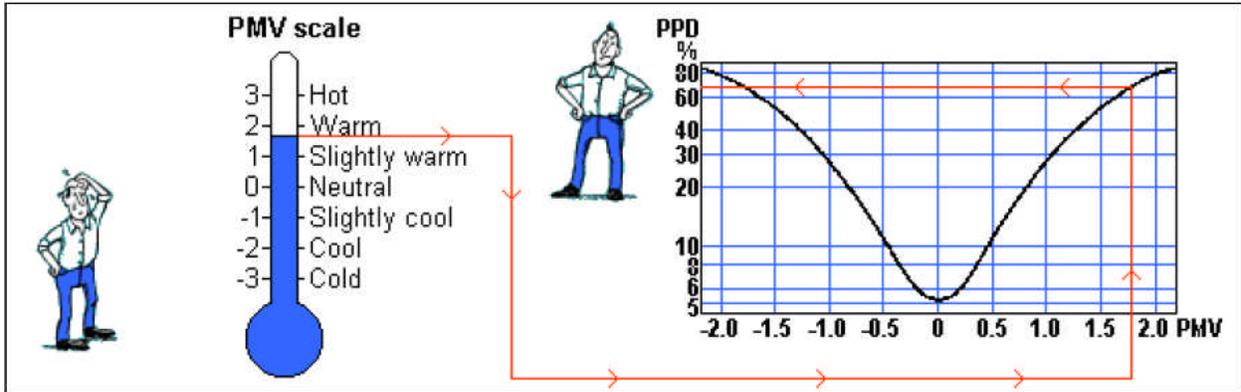


Figura A12. Curva PPD vs PMV, obtenida por Fanger, (Kvisgaard, 1 997).

## A1.2. Técnicas computacionales

### A1.2.1. EnergyPlus

Energy Plus tiene sus raíces en los programas BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) y DOE-2. Estos programas fueron desarrollados y lanzados a finales de los 70s e inicios de los 80s como herramientas de simulación de energía y carga térmica. Su público objetivo fueron ingenieros de diseño y arquitectos que deseaban dimensionar apropiadamente equipos de Acondicionamiento-Ventilación-Calentamiento de Aire (HVAC en inglés), desarrollar estudios de retro-alimentación para análisis de costo de ciclo de vida de equipos, optimización del desempeño de energía, etc. Energy Plus tuvo su origen por consideraciones realizadas luego de la crisis de energía de inicios de los 70s y el reconocimiento de que el consumo energético en edificios era (y es) uno de los mayores componentes dentro de las estadísticas americanas de uso de energía. Los dos programas predecesores intentaron resolver el mismo problema desde perspectivas ligeramente distintas. Ambos programas tiene sus méritos y limitaciones, sus patrocinadores y detractores, sus sólidas bases de usuarios tanto nacionales como internacionales.

Como sus programas padre, Energy Plus es un programa de análisis de energía y simulación de cargas térmicas. Se basa en la descripción del edificio por parte del usuario, esto desde la perspectiva de la realización física del edificio, sistemas mecánicos asociados, etc. Energy Plus calcula las cargas de calentamiento y enfriamiento necesarios para mantener puntos establecidos de control térmico, condiciones asociadas a sistemas secundarios de HVAC, cargas de enfriamiento y la energía consumida por equipos primarios de planta (asociado a calentamiento o enfriamiento de agua para el funcionamiento de equipos), así como otros detalles que son necesarios para verificar que la simulación se está realizando en la forma en que el edificio real lo haría. Muchas de las características de la simulación han sido heredadas de los programas padre BLAST y DOE-2. A continuación se lista algunas de las características del programa en el primer lanzamiento de Energy Plus. La intención de esta lista es dar una idea del rigor y aplicabilidad de Energy Plus para variadas situaciones.

- **Integración, soluciones simultaneas** donde la respuesta del edificio, los sistemas primarios y secundarios están estrechamente acoplados (iteraciones son realizadas cuando son necesarias).
- **Fracciones de hora**, pasos de tiempo son definibles por el usuario para la interacción entre zonas térmicas y medio ambiente; además, se dan pasos de tiempo variables para interacciones entre zonas térmicas y sistemas HVAC (estos varían automáticamente para asegurar la estabilidad de la solución).
- **Condiciones climáticas, archivos de entrada y archivos de salida basados en textos ASCII**, incluye condiciones ambientales horarias o de fracciones de hora, reportes estándar o definibles por el usuario.

- **Balance de energía** basado en técnicas de solución para cargas térmicas de edificios, esto permite cálculos simultáneos de efectos convectivos y radiativos en superficies exteriores e interiores durante cada paso de tiempo.
- **Conducción transitoria de calor**, a través de elementos del edificio tales como paredes, techos, pisos, etc., usando funciones de transferencia de conducción.
- **Modelos mejorados de transferencia de calor en el suelo**, a través de links a modelos de diferencia finita tridimensional y técnicas analíticas simplificadas.
- **Modelos combinados de transferencia de masa y energía que consideran la absorción/des-absorción de humedad**, esto mediante una integración capa por capa dentro de las funciones de transferencia de conducción; o como un modelo de profundidad de penetración efectiva de humedad (EMPD en Inglés).
- **Modelos de confort térmico** basados en la actividad, temperatura de bulbo seco, humedad, etc.
- **Modelos de cielo anisotrópico** para cálculos óptimos de radiación solar difusa sobre superficies inclinadas.
- **Cálculos avanzados en ventanas**, incluyendo persianas controlables, vidriados electrocrómicos, balances de energía capa por capa que permiten apropiadas asignaciones de cristales absorbedores de energía solar y una librería con numerosas ventanas comercialmente disponibles.
- **Controles de iluminación**, incluyendo cálculos de iluminación interior, control y simulación de brillo, control de luminarias y efecto de la reducción de iluminación artificial sobre el calentamiento y enfriamiento.
- **Sistemas de control de lazo**, basado en sistemas HVAC configurables (convencionales y radiantes) que permiten a los usuarios modelar sistemas típicos y sistemas ligeramente modificados, sin necesidad de recompilar el código fuente del programa.
- **Cálculos de polución atmosférica** que predicen CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, producción de hidrocarburos, cuando se realiza alguna conversión de energía, ya sea en el mismo edificio o en un lugar remoto.
- **Links a otros populares programas de simulación** como WINDOW5, WINDOW6 y Delight, esto para permitir análisis más detallados de los componentes del edificio.

Ningún programa es capaz de manejar cada situación de simulación; no obstante, la intención de Energy Plus es manejar tantos edificios y opciones de diseño de sistemas HVAC, ya sea directamente o indirectamente a través de links a otros programas, en orden de calcular cargas térmicas y/o consumo de energía para un día de diseño o un periodo de tiempo extendido (incluyendo más allá de un año). Mientras la primera versión del programa contenía principalmente características directamente ligadas a aspectos térmicos del edificio, las recientes y futuras versiones del programa intentan direccionarse a otros aspectos que también son importantes para la construcción de ambientes: agua, sistemas eléctricos, etc. Por otro lado, es importante notar que cosa NO es Energy Plus.

- Energy Plus no es una interface para el usuario. Su intención es ser un motor de simulación alrededor del cual una tercera interface compañera pueda ser involucrada. Los archivos de entrada y salida son simples textos ASCII, que si bien son descifrables, es mucho más adecuado contar con una interface gráfica de usuario (GUI en Inglés). Este enfoque permite a diseñadores de interfaces hacer lo que mejor saben – producir herramientas de calidad. La disponibilidad de recursos libres de Energy Plus, orientado a la producción de algoritmos, permite que estos sean redireccionados de la mano con el desarrollo de las características de la interface, en orden de mantenerse a paso con las demandas y expectativas de profesionales en edificios.
- Energy Plus actualmente no es una herramienta para análisis de costo de ciclo de vida. Produce resultados que pueden ser alimentados a un programa LCC. En general, cálculos de esta naturaleza son más adecuados en pequeños programas de “utilidad” que pueden responder más rápidamente a cambios en tasas de incremento y cambios en metodologías, indicadas por el estado, federales y agencias de defensa.
- Energy Plus no reemplaza a un arquitecto o a un ingeniero de diseño, ya que no hace un chequeo de entradas; esto es, verifica la aceptabilidad o rango de variación de parámetros (realiza un número limitado de revisiones muy básicas), mas no intenta interpretar resultados. Mientras muchos programas GUI asisten al usuario en afinar y corregir errores de la entrada, Energy Plus aun opera bajo el estándar “basura que ingresa, basura que sale”. Por ello, ingenieros y arquitectos siempre serán una parte vital del diseño y procesos térmicos de ingeniería. (EnergyPlus, 2009).

#### A1.2.2. Interfase gráfica: Google SketchUp y Open Studio

Open Studio es un “parche” gratuito para el programa de dibujo Google SketchUp 3D. El parche hace fácil crear y editar la geometría del edificio en los archivos de entrada de Energy Plus. El parche también permite lanzar simulaciones de Energy Plus y mirar los resultados sin dejar el SketchUp.

Open Studio fue creado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables del Departamento de Energía de Estados Unidos. Diseñado para integrarse con el ambiente de SketchUp, el parche permite usar las herramientas estándar de SketchUp para crear y editar zonas y superficies en Energy Plus.

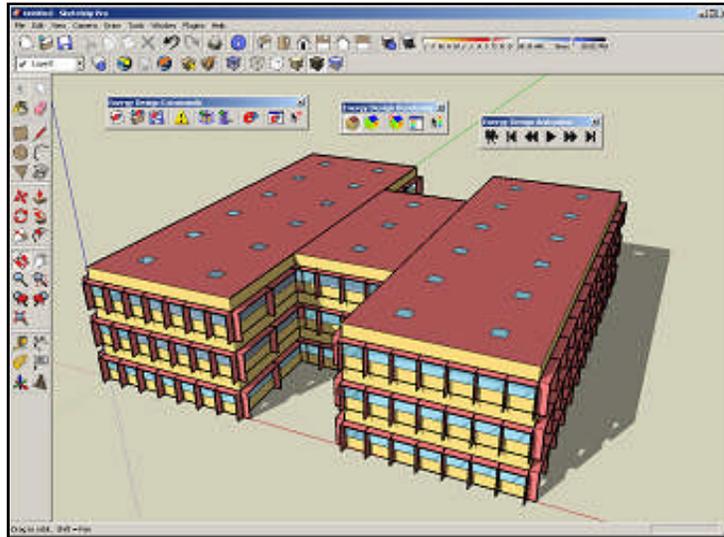


Figura A13. Vista del programa SketchUp usado para dibujar edificaciones en Energy Plus.

### A1.2.3. Panorama general de modelamiento en EnergyPlus

Energy Plus es una colección de muchos módulos que trabajan juntos y calculan la energía requerida para calentar y enfriar un edificio usando una variedad de sistemas y fuentes de energía. Esto lo hace simulando el edificio y los sistemas de energía asociados cuando están expuestos a diferentes condiciones ambientales y de operación. El corazón de la simulación es un modelo del edificio que está basado en principios fundamentales de balance de energía. Desde que es relativamente obvio el estado: “basado en principios fundamentales de balance de energía”, los modelos son descritos usando el código FORTRAN. Sale a la vista que el modelo en sí es relativamente simple comparado con la organización de datos y control que es necesario para simular las muy grandes combinaciones de tipos de sistemas, arreglos de energía primaria de plantas, calendarios y medio ambiente. A continuación se muestra de forma esquemática una vista de la organización del programa y sus módulos, (EnergyPlus, 2009).

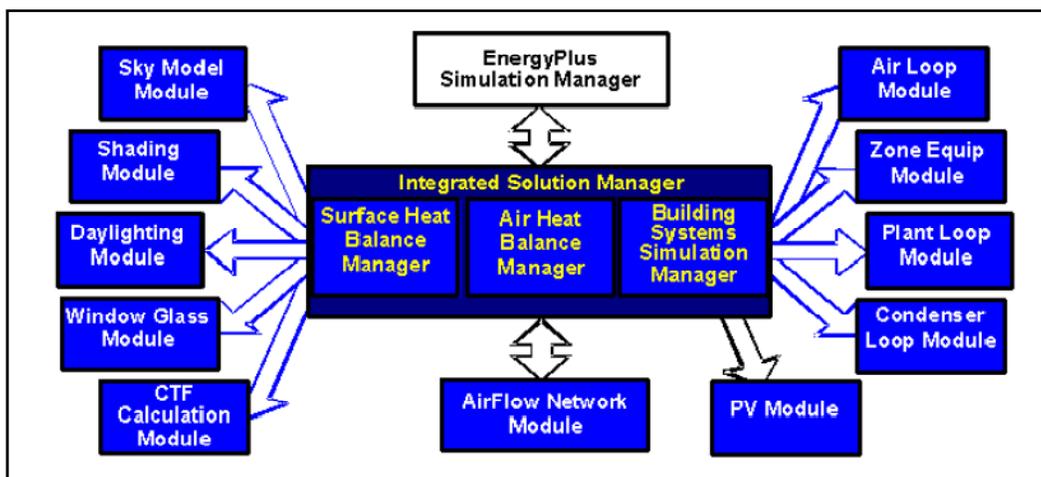


Figura A14. Esquema del programa Energy Plus, (EnergyPlus, 2009).

#### A1.2.4. Manejo integrado de la solución

Energy Plus es una simulación integrada. Esto significa que las tres mayores partes: el edificio, los sistemas (asociado a sistemas de control HVAC) y plantas (asociados a sistemas de control de agua) deben ser resueltos simultáneamente. En programas con simulación secuencial, tales como BLAST o DOE-2, las zonas de edificios, sistemas de manejo de aire y equipos de planta central son simulados secuencialmente sin retroalimentación uno con otro. La solución secuencial empieza con un balance de energía de la zona que actualiza las condiciones de la zona y determina las cargas de calentamiento/enfriamiento en todos los pasos de tiempo. Esta información alimenta a la simulación de sistemas de manejo de aire (HVAC) para determinar la respuesta de estos sistemas, pero esa respuesta no afecta las condiciones de la zona. De forma similar, la información del sistema es pasada a la simulación de planta sin retroalimentación. Esta técnica de simulación trabaja bien cuando la respuesta del sistema (HVAC) es una función bien definida de la temperatura del aire en el espacio acondicionado.

Para obtener una simulación que es físicamente realista, los elementos tienen que estar ligados en un esquema de solución simultánea. En Energy Plus todos los elementos son integrados y controlados por un Administrador de Solución Integrada. Los lazos son divididos en lados de alimentación y demanda, y el esquema de solución generalmente se confía en iteraciones sucesivas de sustitución para reconciliar alimentación y demanda usando la filosofía Gauss-Seidell de continua actualización.

Por razones de estabilidad el programa derivó una ecuación para la temperatura de la zona que incluyera el término inestable de capacitancia de la zona e identificó métodos para determinar condiciones de la zona y respuestas del sistema en pasos de tiempo sucesivos. La formulación del esquema de solución empieza con un balance de energía de la zona, (EnergyPlus, 2009).

## A1.2.5. Detalle de la modelación de transferencia de calor por conducción

### A1.2.5.1. Cálculo de las funciones de transferencia por conducción

El método básico usado en Energy Plus para los cálculos asociados a la FTC es conocido como método de Espacio de Estado (Ceylan and Myers 1980; Seem 1987; Ouyang and Haghghat 1991). Otro método usado para lograr la solución, más común y antiguo, es el de las transformaciones de Laplace; el método de Laplace fue usado en BLAST (Hittle, 1979; Hittle & Bishop, 1983). El sistema de espacio de estado básico es definido por las siguientes ecuaciones lineales de matrices:

$$\begin{aligned}\frac{d[\mathbf{x}]}{dt} &= [\mathbf{A}][\mathbf{x}] + [\mathbf{B}][\mathbf{u}] \\ [\mathbf{y}] &= [\mathbf{C}][\mathbf{x}] + [\mathbf{D}][\mathbf{u}]\end{aligned}\tag{A7}$$

donde  $\mathbf{x}$  es un vector de variables de estado,  $\mathbf{u}$  es un vector de entrada,  $\mathbf{y}$  es el vector de salida,  $t$  es el tiempo, y  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  y  $\mathbf{D}$  son matrices de coeficientes. A través del uso del álgebra de matrices, el vector de variables de estado  $[\mathbf{x}]$  puede ser eliminado del sistema de ecuaciones y el vector de salida  $[\mathbf{y}]$  puede ser directamente relacionado al vector de entrada  $[\mathbf{u}]$  y al historial en el tiempo de los vectores de entrada y salida.

Esta formulación puede ser usada para resolver la ecuación de conducción de calor transitoria, recurriendo a una rejilla de diferencias finitas sobre las varias capas del elemento del edificio siendo analizado. En este caso, las variables de estado son las temperaturas nodales, las temperaturas ambientales (interior y exterior) son las entradas, y el flujo de calor resultante en ambas superficies son las salidas. Por lo tanto, la representación en el espacio de estados con variables de diferencia finitas podría tomar la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \begin{matrix} T \\ \vdots \\ T \end{matrix} &= [\mathbf{A}] \begin{matrix} T \\ \vdots \\ T \end{matrix} + [\mathbf{B}] \begin{matrix} T \\ T \end{matrix} \\ \begin{matrix} q'' \\ q'' \end{matrix} &= [\mathbf{C}] \begin{matrix} T \\ \vdots \\ T \end{matrix} + [\mathbf{D}] \begin{matrix} T \\ T \end{matrix}\end{aligned}\tag{A8}$$

donde  $T_1, T_2, \dots, T_n, T_{n+1}$  son las temperaturas nodales de diferencia finita,  $n$  es el número de nodos,  $T_i$  y  $T_{i+1}$  son las temperaturas ambientales interior y exterior, y  $q''_i$  y  $q''_{i+1}$  son los flujos de calor (salida deseada).

Seem (1987) muestra que para una pieza simple de una sola capa con dos nodos interiores, como se muestra en la figura siguiente, y convección en ambos lados, las ecuaciones de diferencias finitas resultantes están dados por el balance mostrado a continuación (este es un ejemplo ilustrativo, el balance es incorrecto ya que se asume sólo transferencia de calor por convección cuando en realidad también hay intercambio de energía por radiación).

$$C \frac{dT}{dt} = hA(T_i - T_{i+1}) + \frac{T_i - T_{i-1}}{R}$$

$$C \frac{dT}{dt} = hA(T_{i+1} - T_i) + \frac{T_{i+1} - T_{i+2}}{R}$$

$$q''_i = h(T_i - T_{i+1})$$

$$q''_{i+1} = h(T_{i+1} - T_{i+2})$$

(A9)

donde

$$R = \frac{l}{kA}$$

$$C = \frac{\rho c l A}{2}$$

(A10)

y  $A$  es el área de la superficie expuesta a las temperaturas ambientales. En formato de matriz

$$\begin{bmatrix} \frac{dT}{dt} \\ \frac{dT}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{hA}{C} & 0 \\ 0 & \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i-1} \\ T_{i+2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} q''_i \\ q''_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -h \\ h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -h \\ h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i-1} \\ T_{i+2} \end{bmatrix}$$

(A11)

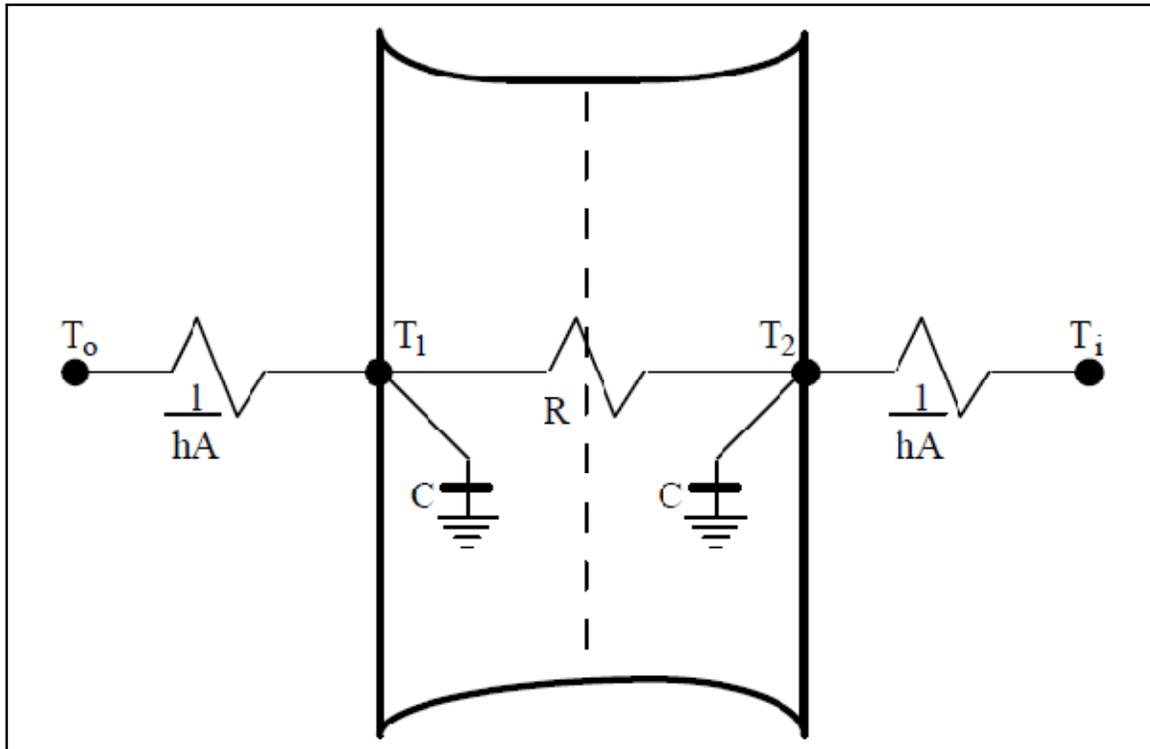


Figura A15. Ejemplo de dos nodos en el espacio de estados, (EnergyPlus, 2009).

El aspecto importante de la técnica de espacio de estados es que a través del uso del álgebra de matrices, las variables del espacio de estados (temperaturas nodales) pueden ser eliminadas para llegar a una ecuación de matrices que da las salidas (flujos de calor) solamente en función de las entradas (temperaturas ambientales). Esto elimina la necesidad de resolver las raíces en el dominio de Laplace. En adición, la forma resultante de la matriz tiene más significado físico que las complejas funciones requeridas por el método de transformada de Laplace.

La exactitud del cálculo de las FTCs por el método de espacio de estados ha sido direccionada en la literatura. Ceylan y Myers (1980) compararon la respuesta predicha por el método de espacio de estados con varias otras técnicas de simulación, incluyendo soluciones analíticas. Sus resultados mostraron que para un número adecuado de nodos, el método de espacio de estados computó un flujo de calor en la superficie de un material de una capa simple dentro del 1% de la solución analítica. Ouyan y Haghghat (1991) hicieron una comparación directa entre los métodos de espacio de estados y Laplace; para una pared compuesta de aislamiento entre dos capas de concreto, ellos hallaron casi ninguna diferencia en los factores de respuesta calculados por cada método.

Seem (1987) resumió los pasos requeridos para obtener los coeficientes FTC de las matrices A, B, C y D. Mientras el consumo de tiempo es mayor que calculando los FTCs usando el método de transformada de Laplace, el álgebra de matrices (incluyendo el cálculo de una matriz inversa y exponencial para A) es más fácil de seguir que los algoritmos para hallar las raíces. Otra diferencia entre los métodos de Laplace y de espacio de estado es el número de coeficientes

requeridos para una solución. En general, el método de espacio de estados requiere más coeficientes. En adición, el número de términos de temperatura e historial de flujos es idéntico ( $n_z = n_q$ ). Notar que tal como en el método de Laplace, el número real de términos variará de construcción en construcción.

Dos ventajas distintas del método de espacio de estado sobre el método de Laplace, que son de interés cuando se aplica una solución de FTC para conducción a través de elementos del edificio, son la habilidad para obtener FTCs en pasos de tiempo más cortos y la habilidad para obtener funciones de transferencia de conducción en 2 y 3 dimensiones. Mientras no implementados en el paquete de herramientas, ambos Seem (1987) y Strand (1995) han demostrado la efectividad del método de espacio de estado en el manejo de estas situaciones que puede tener importancia en aplicaciones en edificios (EnergyPlus, 2009).

#### A1.2.5.2. Cálculos FTC en EnergyPlus

Las funciones de transferencia de conducción son un método eficiente para computar flujos de calor en superficies debido a que eliminan la necesidad de conocer temperaturas y flujos dentro de la superficie. Sin embargo, las series de funciones de transferencia de conducción se convierten progresivamente más inestables cuando el paso de tiempo decrece. Esto se convirtió en un problema a medida que las investigaciones dentro de métodos computacionales de paso de tiempo corto para las interacciones entre zona/sistema progresaron; esto debido a que, eventualmente, esta inestabilidad causaría la divergencia de la simulación completa.

Las ganancias de calor de la zona consisten de ganancias de calor específicas, intercambio de aire entre zonas, intercambio de aire con el ambiente exterior, y calor convectivo transferido desde las superficies de la zona. De estos, la carga de convección de las superficies requiere los cálculos más complicados, debido a que un balance de energía detallado es requerido en el lado interior y exterior de la superficie de cada pared, piso y techo. Además, la conducción transitoria de calor dentro del material entre las superficies debe ser resuelta, esta solución da las temperaturas interiores y exteriores y los flujos de calor que deben ser conocidos en orden de calcular la componente de calor convectiva para la carga de la zona asociada a cada superficie de la zona. BLAST usa un método de función de transferencia de conducción FTC atribuido a Hittle (1980) para resolver el problema de conducción transitoria para cada superficie. El método resulta en unas series temporales de factores ponderados que, cuando son multiplicados por valores previos de temperatura y flujos de la superficie, y las temperaturas superficiales interiores y exteriores actuales, dan los flujos de calor interiores y exteriores actuales. El método es fácilmente aplicado a construcciones multicapas para las que soluciones analíticas no están disponibles. En adición, la determinación de los coeficientes de la serie de FTC es un cálculo realizado una vez, haciendo el método mucho más rápido que cálculos de diferencia finita.

Un problema con los métodos FTC es que el paso de tiempo de las series es fijo; esto es, una serie FTC computada para un paso de tiempo de una hora toma información en  $t-1$  horas,  $t-2$

horas, etc. y computa condiciones en el tiempo actual  $t$ ; cuando el tiempo avanza el término más antiguo en la serie de entrada es dejado y el dato es movido atrás un paso de tiempo para permitir que el valor más nuevo sea agregado a las series. Por conveniencia, el paso de tiempo usado para determinar las series FTC debería ser el mismo que el paso de tiempo usado para actualizar la temperatura media del aire de la zona en el balance de energía de la zona; pero, cuando el paso de tiempo usado para calcular las series FTC se vuelve más corto, el número de términos en la serie crece, eventualmente, con suficientes términos, la serie llega a ser inestable debido al truncado y redondeo de error. Construcciones pesadas, tales como bloques de concreto sobre pisos (12" de concreto sobre 18" de tierra), tienen problemas de exactitud y estabilidad en pasos de tiempo tan grandes como 0.5 horas cuando son modelados por el método de FTC de Hittle. En un intento para superar este problema, el método de Hittle fue reemplazado por el método de Seem (1987) en IBLAST. Esto resultó en algunas mejoras en la estabilidad en pasos de tiempo cortos, pero no lo suficientes para permitir que IBLAST corriera en pasos de tiempo de 0.1 horas sin restricciones en el tipo de superficies que pueden ser usados.

No obstante, los métodos de FTC requieren que los valores de temperaturas y flujos de la superficie sean almacenados para sólo unos pocos específicos tiempos antes del tiempo actual, los historiales de temperatura y flujos son, realmente, funciones continuas entre esos puntos discretos. Sin embargo, no hay forma de calcular información en esos tiempos intermedios una vez la serie ha sido inicializada. Los términos en los historiales de temperatura y flujo están fuera de fase con estos puntos. Sin embargo, ellos pueden ser calculados moviendo la fase de los historiales de temperatura y flujo por sólo una fracción de paso de tiempo. Este procedimiento podría permitir que una serie computada para un paso de tiempo  $\Delta t$ , pueda ser usada para computar información en tiempos  $t + \Delta t/2$ ,  $t + \Delta t/3$ ,  $t + \Delta t/4$ , o cualquier otra fracción arbitraria de paso de tiempo, tan larga mientras los valores de temperatura y flujo de la superficie aún estén separados  $\Delta t$ . A continuación se muestran formas de lograr esto.

El método mostrado en la siguiente figura mantiene dos grupos de historiales fuera de fase uno con otro. La figura muestra como esto podría trabajar para dos grupos de historiales desfasados en un valor igual a la mitad del paso de tiempo. Más grupos de historiales de temperatura y flujo pueden ser usados, permitiendo que el paso de tiempo de la simulación tome valores:  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/5$ , etc., del mínimo paso de tiempo permitido para cálculos de FTC. El paso de tiempo entre entradas para las series FTC podría ser el intervalo más pequeño conveniente en el que las series FTC sean estables. Este escenario es ilustrado en esta figura para dos grupos separados de historiales de temperatura y flujo. Cíclicamente a través de cada historial, es posible permitir cálculos de balance de energía usando información actualizada de la superficie en un paso de tiempo más corto del que podría permitir una serie de historial FTC. Este método no requiere interpolación entre las series una vez cada grupo de historiales fue inicializado. No obstante, si el paso de tiempo más pequeño para una serie estable FTC fue grande comparada al paso de tiempo de actualización de la temperatura de la zona, la memoria requerida para almacenar todos los grupos de historiales es significativa (EnergyPlus, 2009).

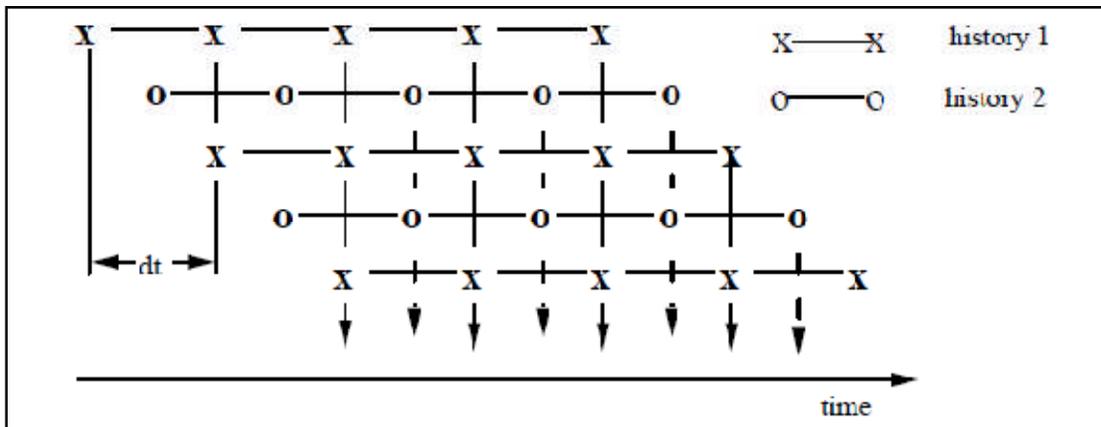


Figura A16. Múltiple, esquema de etapa en el historial de tiempo, (EnergyPlus, 2009).

Otro método es mostrado en la figura “Interpolación secuencial de nuevos historiales” que usa interpolaciones sucesivas para determinar el siguiente grupo de historiales de temperatura y flujo. El historial actual es interpolado directamente del grupo historial previo usando el corrimiento de fase de tiempo requerido entre los dos. Este método requiere almacenamiento permanente para solamente un grupo de historial de temperatura y flujo en un tiempo, no obstante, suaviza los datos de salida de temperaturas y flujos mientras más interpolaciones son realizadas. Como resultado, en tiempos de simulación coincidentes los valores actuales de los términos del historial son diferentes de los términos “en fase” previos. Esto es inaceptable desde un punto de vista físico, debido a que permite que la información actual cambie valores de tiempos previos, (EnergyPlus, 2009).

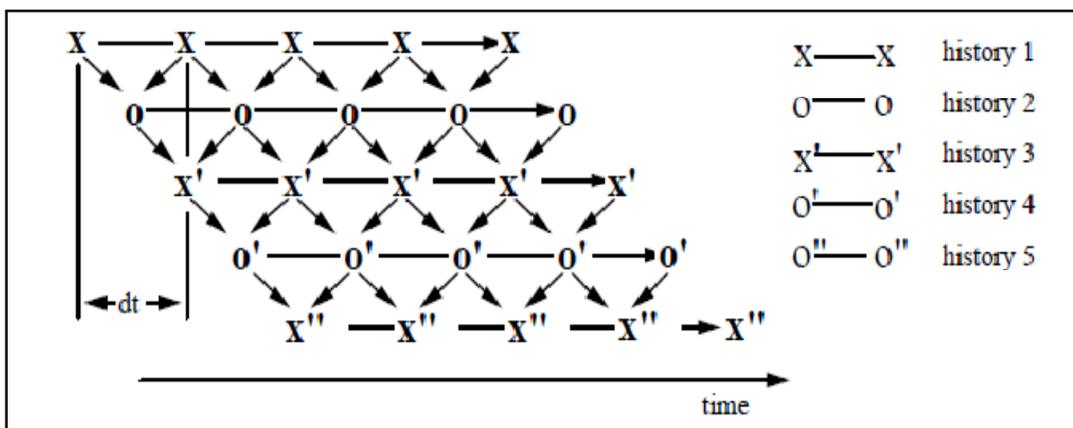


Figura A17. Interpolación secuencial de nuevos historiales, (EnergyPlus, 2009).

Un método final, mostrado en la figura “Historial maestro con interpolación”, fue un tipo híbrido de los dos métodos previos. Un grupo historial “maestro” fue mantenido y actualizado durante todo el tiempo; esto resolvió el problema de eventos actuales propagando información retrasada en el tiempo. Cuando flujos de la superficie necesitados para ser calculados en tiempos fuera de

fase con este historial maestro, un nuevo historial temporal es interpolado de los valores del maestro. Este método probó ser el mejor de las tres opciones descritas debido a que eliminó la

propagación de información retrasada en el tiempo y sólo requirió almacenamiento coincidente de los dos grupos de historiales de temperatura y flujo. Este método fue incorporado subsecuentemente dentro del programa IBLAST en conjunción con el procedimiento de Seem para calcular los coeficientes de las series FTC, (EnergyPlus, 2009).

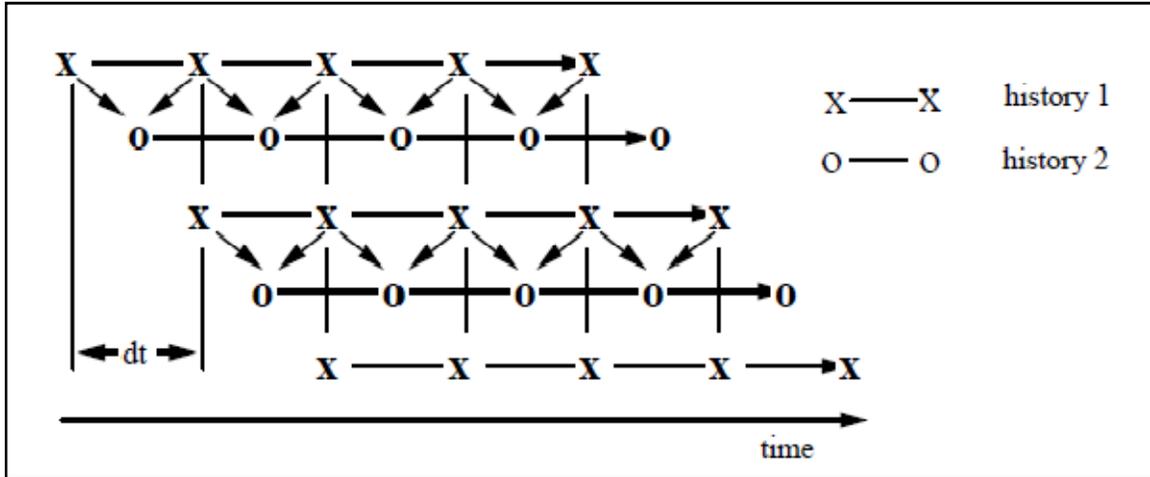


Figura A18. Interpolación con el historial maestro, (EnergyPlus, 2009).

## A2. PLANOS DE LA VIVIENDA

### A2.1. Planos de la vivienda en su estado inicial (Junio 2008)

## A2.2. Planos de la vivienda después de la modificación (Septiembre 2009)

### A3. COSTOS DE LAS MODIFICACIONES CONSTRUCTIVAS

Los gastos asociados a las obras de modificación constructiva de la vivienda seleccionada en esta investigación se mencionan a continuación.

*Tabla A5. Gastos asociados a la modificación constructiva de la vivienda seleccionada.*

<b>VIVIENDA MODIFICADA CONSTRUCTIVAMENTE</b>	
ÁREA TOTAL DE LA VIVIENDA EN SU ESTADO ORIGINAL (m <sup>2</sup> )	74,00
GASTO SÓLO EN MATERIALES (SOLES)	7282,76
GASTOS SÓLO EN TRANSPORTE (SOLES)	1500
GASTO SÓLO EN PERSONAL (SOLES)	975
GASTO TOTAL (SOLES)	9757,76
DURACIÓN DE OBRAS	21 días trabajando 3 hombres