

Evaluación del Riesgo de Discomfort Higrotérmico en Edificios

Halimi Sulaiman. Arquitecta. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. Universidad Nacional de San Juan, (2004). Doctora en Arquitectura. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. Universidad de Mendoza. Becaria Posdoctoral CONICET. Miembro de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. e-mail: halimi.sulaiman@gmail.com.

Fernando Olsina. Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan, (2000). Doctor en Ingeniería. Instituto de Energía Eléctrica. Universidad Nacional de San Juan, (2005). Investigador del CONICET. Instituto de Energía Eléctrica. Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). e-mail: olsina@iee.unsj.edu.ar

Resumen

El diseño y la construcción de los edificios determinan junto con el clima las condiciones higrotérmicas interiores y el consumo energético durante la vida útil. Este artículo presenta una nueva metodología probabilística que permite cuantificar el riesgo de discomfort higrotérmico de cualquier edificación. Mediante simulación estocástica es posible establecer la frecuencia y duración esperada de eventos de discomfort en cada local del edificio y el consumo esperado de energía para su climatización. Se sintetizan aquí los conceptos fundamentales, los índices de confiabilidad y riesgo y los modelos numéricos desarrollados. Para ilustrar las implicancias de la evaluación de riesgo de discomfort en el proceso de diseño, se ha determinado el riesgo higrotérmico que presenta de una vivienda convencional climatizada y así como su variante bioclimática.

Palabras claves: diseño térmico, confiabilidad, simulación higrotérmica.

Abstract

Along with the outdoor climate, the design and construction of buildings determine the indoors conditions and the energy consumption through their lifespan. This paper presents a novel methodology for quantifying the higrothermal comfort risk of any building design. By means of stochastic simulations, the expected frequency and duration of discomfort events in each room of building and the expected energy consumption associated to heating and cooling can be determined. Fundamental concepts, reliability indexes and numerical models are presented. In order to illustrate the proposed approach in the design process, the comfort risk of a residential house conventionally climatized and a bioclimatic variant is assessed.

Keywords: thermal building design, reliability, higrothermal simulation.

Introducción

Debido al impacto que genera el uso de energías convencionales sobre el ambiente, el diseño bioclimático de edificios de bajo consumo energético ha recibido gran atención en los últimos años. Ello se debe a que en todos los países los edificios son grandes consumidores de energía, esencialmente por la operación de los equipos de climatización. En Argentina los edificios representan el 40% de la demanda energética total, la cual el 90% proviene de fuentes no renovables (Evans, 2010). Estos consumos pueden disminuirse a través del correcto diseño morfológico, orientación apropiada, selección de envolventes edilicias y componentes constructivas. Las estrategias de diseño bioclimáticas (EB) permiten obtener niveles adecuados de confort minimizando el uso de la energía convencional.

Los edificios están sujetos a condiciones climáticas fluctuantes. Parte de la variabilidad del clima es aleatoria e introduce considerable incertidumbre en las condiciones higrotérmicas interiores y la efectividad de algunas EB (Boland, 1997). El edificio debe preservar las condiciones de confort y habitabilidad interiores independientemente de la severidad y persistencia del clima exterior. Las EB con dependencia del clima introducen incertidumbre en el comportamiento térmico del edificio. Por ejemplo, en sistemas solares de calefacción, la disponibilidad de energía solar suele estar severamente limitada precisamente durante los periodos de mayor demanda de calefacción, lo que puede comprometer el confort interior durante los periodos críticos.

Una de las preguntas en el proceso de diseño térmico es cuán seguras y confiables son las estrategias convencionales y bioclimáticas para garantizar condiciones de confort pre-establecidas en presencia de condiciones meteorológicas variables, tanto en severidad como en duración. Se han realizado intentos para incluir incertidumbre en la simulación higrotérmica de edificios, especialmente climáticas. El trabajo de Jiang y Hong (1993) es uno de los primeros en evaluar el comportamiento térmico bajo condiciones aleatorias de clima. Bzowska (2002) calcula el valor medio y la desviación estándar de la temperatura interior con un simple modelo de simulación binodo. Esa metodología propone para simulación, la superposición de variables climáticas estocásticas y determinísticas. Pietrzyk (2000) desarrolló un modelo probabilístico analítico para evaluar la confiabilidad térmica de viviendas considerando infiltración de aire y pérdida de calor. El modelo ignora la dependencia temporal de los fenómenos climáticos y del comportamiento del edificio, como los efectos como la inercia térmica en la termodinámica de la edificación.

El presente trabajo muestra una nueva metodología para evaluar el nivel de confiabilidad higrotérmico de un diseño de edificio (Sulaiman, 2011). Mediante técnicas de simulación estocástica es posible establecer la frecuencia y duración esperada de eventos de desconfort en cada local del edificio y el consumo esperado de energía para su climatización, bajo condiciones climáticas aleatorias. Este análisis probabilístico de desempeño propicia una apropiada evaluación y comparación entre las variadas alternativas de diseño. Esta información permite establecer restricciones en el proceso de optimización económica del diseño térmico, evitando el sobre o subdimensionamiento de los equipos de climatización, el nivel de aislación en envolventes, la masa térmica o la superficie de captación solar, satisfaciendo al mismo tiempo indicadores de riesgo de desconfort máximo admisibles.

Confiabilidad en el confort higrotérmico y riesgo de desconfort

Se define Confiabilidad de Confort Higrotérmico (CCH) a la capacidad de un diseño arquitectónico de mantener en su interior condiciones preestablecidas de confort higrotérmico, ante fluctuaciones aleatorias del clima exterior. La CCH se puede expresar como la probabilidad que el edificio pueda sostener las condiciones interiores dentro de la región de confort fijada. El diseño por confiabilidad es ampliamente utilizado para el diseño de instalaciones nucleares, en la industria aeroespacial, en los sistemas energéticos, el dimensionamiento de estructuras civiles, etc., proponiéndose aquí una extensión al diseño térmico de las edificaciones.

La probabilidad que el edificio satisfaga los requerimientos higrotérmicos dependerá del diseño, su orientación, la superficie de captación solar, los materiales y componentes constructivos, la capacidad instalada de climatización y la severidad del clima del lugar. Las exigencias que se impongan al rango en que pueden fluctuar las condiciones interiores tienen también un impacto determinante en la probabilidad de poder de satisfacer los requerimientos higrotérmicos. Por lo tanto, la región de confort aceptable debe establecerse con suma prudencia conforme a la función y uso de la edificación (ej. vivienda, oficina, gimnasio, sanatorio, museo, biblioteca, archivos, etc.) y de cada local (ej.: dormitorios, salas de lectura, sala de cuidados intensivos, depósito, etc.). La región de confort se define como límites máximos y mínimos para la temperatura y la humedad. El establecimiento de la región de confort se realiza habitualmente de acuerdo a estándares y normas específicas (ASHRAE, 2005).

El nivel mínimo de CCH del edificio puede ser impuesto como un requisito que debe cumplir el diseño para garantizar que las condiciones de confort son satisfechas con elevada probabilidad. El nivel de exigencia sobre la CCH condicionará las características esenciales del diseño y determinará los costos iniciales del edificio para climatizarlo y el consumo futuro de energía para operar los equipamientos de calefacción y refrigeración. Por tanto el nivel mínimo de confiabilidad debe ser también escogido cuidadosamente para no sobredimensionar o sub-dimensionar las instalaciones afectando la economía del edificio.

Índices de confiabilidad y riesgo

Con el propósito de describir cuantitativamente el nivel de confiabilidad del sistema se utilizan indicadores probabilísticos. La CCH se expresa normalmente como una probabilidad, pero puede también anualizarse, expresando el tiempo esperado anual en [h/a] que el edificio satisface para las condiciones de confort impuestas.

A veces es conveniente utilizar el concepto complementario de Riesgo de Discomfort Higrotérmico (RDH), definido como la probabilidad que el edificio no mantenga el confort interior dentro de la región preestablecida. Puesto que las condiciones higrotérmicas del edificio pueden residir en dos estados mutuamente exclusivos: aceptable o no aceptable, el RDH se determina conforme a la identidad de complementariedad $CCH+RDH=1$.

Si bien el RDH indica la probabilidad de ocurrencia de eventos de discomfort, no señala la magnitud de los mismos. Es usual entonces utilizar conjuntamente con el RDH indicadores complementarios. El valor esperado de temperatura y humedad durante los eventos de discomfort reflejan la magnitud de los desvíos (violaciones) respecto de los límites de la región de confort establecida.

Otros indicadores que conjuntamente con los anteriores, dan una idea más integral del nivel de confiabilidad y riesgo higrotérmico de un determinado diseño son la frecuencia esperada de ocurrencia de eventos de discomfort interior, expresada por ejemplo en ocurrencias por año, y la duración esperada de estos eventos.

Cada uno de estos indicadores puede ser desagregado en cuatro índices específicos para indicar la causa de ocurrencia y la dirección de los desvíos respecto de cada límite de la zona de confort definida. Así habrá indicadores para los límites superiores e inferiores de temperatura y humedad aceptable. Asimismo, cada uno de estos indicadores puede ser estimado para el periodo anual, o para ciertas estaciones, meses u horas del día. La desagregación de los indicadores brinda información relevante del tipo y causa de los problemas de confiabilidad del edificio, favoreciendo la identificación de soluciones en el proceso de optimización del diseño.

Modelos Numéricos

Para identificar la ocurrencia de eventos de discomfort que presenta un diseño edilicio debe recurrirse a modelos numéricos que permitan reproducir el comportamiento higrotérmico interior bajo una serie cronológica de condiciones meteorológicas. El modelo térmico del edificio debe replicar los fenómenos termodinámicos (conducción, convección y radiación) que actúan sobre la edificación y los fenómenos de transporte de masa (ej. ventilación). Asimismo debe contemplar la acumulación de calor en la masa del edificio (inercia térmica) la cual provoca un amortiguamiento de las condiciones externas en el interior, y además un acoplamiento temporal entre intervalos de tiempo.

Idealmente el modelo debe considerar también la interacción que existe entre temperatura y humedad relativa (HR), y el fenómeno de acumulación e intercambio de esta última en el mobiliario, cortinados, maderas, etc.

Por ser de código abierto se ha utilizado el modelo HAMbase que considera los fenómenos mencionados. Las características del edificio, tales como cantidad de locales, morfología, orientación, materiales, equipos de calefacción y refrigeración deben ser introducidas como datos de entrada. Como resultado se obtiene una serie cronológica horaria de temperatura y humedad del interior de cada local, así como el consumo de energía para climatización.

Conforme a la severidad del año utilizado en la simulación, será el número, duración y magnitud de los eventos de discomfort que presenta el diseño bajo análisis. Para obtener resultados estadísticamente

significativos se deben utilizar un gran número de años en la simulación que permita explorar el comportamiento del edificio bajo eventos climáticos infrecuentes, pero de gran severidad. Si no se dispone de datos climáticos de suficiente extensión para la zona de interés, debe generarse una base de datos sintética del clima basada en los registros existentes.

La evaluación estadística de las condiciones higrotérmicas horarias en cada local resultantes de la simulación masiva de escenarios anuales, permite estimar el nivel de confiabilidad y riesgo que presenta el diseño analizado. La ventaja de las técnicas de simulación estocástica (método de Monte Carlo) reside en que puede resolverse el problema prácticamente sin simplificaciones. La desventaja radica en el uso intensivo de recursos computacionales. Este inconveniente se ha atenuado debido al rápido crecimiento del poder de cómputo y la arquitectura multi-núcleo de los procesadores modernos.

Resultados

Para demostrar la metodología propuesta, se evalúa la confiabilidad de una vivienda con climatización convencional (CasaConv) y un diseño modificado bioclimáticamente (CasaBio) considerando el clima de San Juan. La CasaConv (Fig.1) está apareada, (muro O adiabático en este caso), presenta la mejor orientación en todos los locales, ganancia solar N (12,5%/superficie útil), excluyendo baño y cocina, negación de E y O, protección solar N y vientos fríos del S a través de ventanas comunes con persianas. En la Tabla 1 se exponen las características constructivas, transmitancias térmicas K y coeficientes globales de pérdida G calculados (Norma IRAM 11601, 2002), donde se evidencian las diferencias incorporadas en la CasaBio.

En la Fig. 2 se muestra la simulación horaria de temperatura y la HR interiores de la CasaConv, junto con las condiciones exteriores. Si bien las temperaturas son mayormente aceptables, la zona 1 muchas veces pierde confort durante el invierno, y en menor grado en verano. La HR por su parte, disminuye en invierno debido a la calefacción, mientras que en verano acompaña los picos exteriores con considerable inestabilidad. Es destacable en la Fig. 3 el bajo nivel de la confiabilidad lograda con la climatización convencional (CCH=46.9%, RDH = 53.1%), puesto que existen 4651 h/a donde la vivienda no es capaz de sostener condiciones de confort, sea por violaciones a los límites de temperatura o HR, o ambos a la vez. La duración esperada de los eventos de desconfort (EDDE) es de 33h y la frecuencia anual de eventos de desconfort (ELCF) es 76.5 a-1. El clima interior se distribuye en dos áreas alargadas en los límites inferior y superior de temperatura, abarcando casi todo el rango de HR.

Para el mismo año simulado, la Fig. 4 ilustra el comportamiento de las temperaturas y HR interiores de la CasaBio. Se observa por un lado, la inexistencia de horas fuera de las temperaturas establecidas, y por otro una HR controlada en el límite inferior de la región de confort fijada. Sin embargo, es necesario corregir el diseño para evitar la inestabilidad por exceso de la misma, dado que alcanza el 97% en marzo (día 73), superando el 70% en reiteradas ocasiones. En la Fig. 5 se presentan los índices de confiabilidad, los mapas de confort en 2D y 3D, donde las temperaturas adoptan dos zonas lineales interiores a los límites, marcando un punto de mayor densidad en la HR mínima, debido a la acción del humidificador. Los índices muestran que este diseño arquitectónico alcanza un elevado nivel de confiabilidad (CCH 98.5%, o una duración esperada de 128 h anuales), donde el riesgo se debe principalmente a un exceso de HR en verano y un sobrecalentamiento en la misma época. El mapa de confort 3D refleja un pronunciado pico en la zona de 20°C y humedad del 31%, indicando que estas son las condiciones interiores más probables. Se demuestra así que la metodología propuesta permite cuantificar el riesgo de desconfort ante modificaciones en el diseño térmico. Es posible afirmar que con la incorporación de un deshumidificador, generalmente contenido en el equipo de refrigeración, la CCH podría alcanzar el 100%. La Tabla 2 muestra los consumos energéticos anuales esperados de ambas viviendas, donde se observa un ahorro de 59.9% en la vivienda bioclimática.

Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para evaluar la confiabilidad higrotérmica que presenta un diseño edilicio, basada en simulación estocástica del comportamiento térmico de la edificación. La metodología propuesta permite cuantificar la incertidumbre de las condiciones interiores y el riesgo de discomfort del edificio bajo consideración de la naturaleza aleatoria del clima exterior. Se han desarrollado un número de indicadores probabilísticos para caracterizar el nivel de confiabilidad. Estos indicadores pueden ser utilizados como restricciones a satisfacer durante el proceso del diseño térmico del edificio y la optimización del mismo. Se han desarrollado además herramientas de visualización gráficas que son de gran ayuda en este proceso. La representación tridimensional y por estación permite corregir el diseño térmico hasta que satisfaga las condiciones de riesgo higrotérmico máximo aceptable. Así es posible dimensionar la masa térmica, el espesor de aislación, las capacidades de los equipos de climatización, tamaño de aberturas, etc., tal que el costo total del edificio (costos de inversión y costos futuros de climatización) sea mínimo.

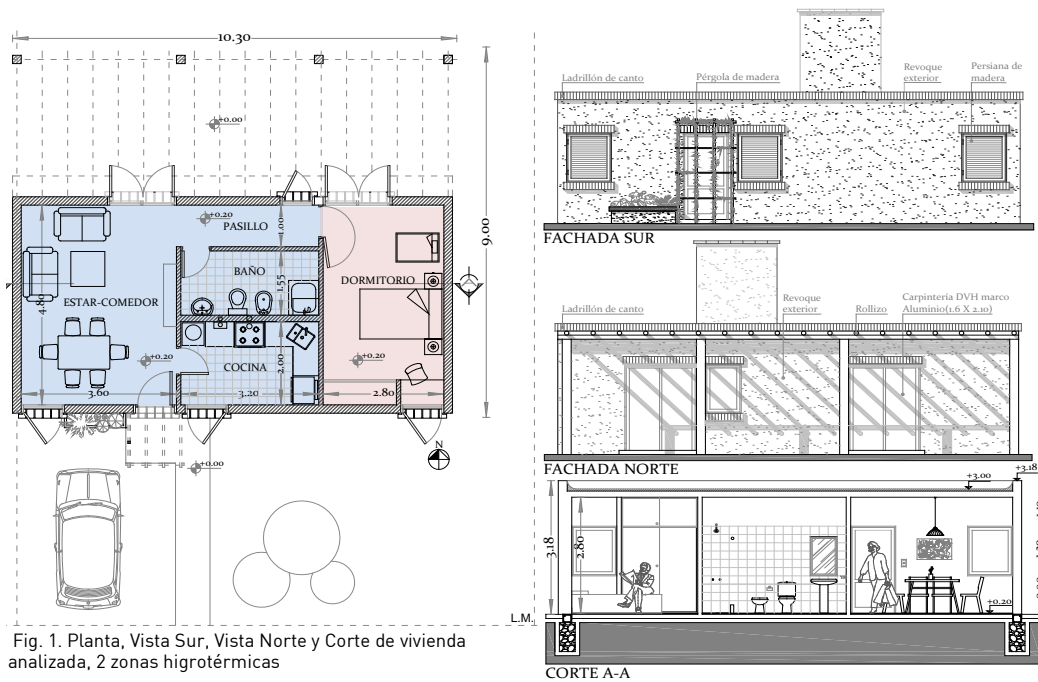


Fig. 1. Planta, Vista Sur, Vista Norte y Corte de vivienda analizada, 2 zonas higrotérmicas

Descripción constructiva Casaconv y CasaBio	Espesor m ²	Sup. m ²	K (W/°C m ²)
Muro Ladrillón 0.17 m + revoque en ambas caras	0.20	47.40	1.97
Idem ant. + 0,05 m poliestireno 15 kg/m ² + ladrillón de canto 0,07 m	0.32	34.00/ 13.40*	0.53
Tabique interior no portante	0.12	37,50	-
Losa cerámica pretensada + 0.02 m H° con perlita	0.22	47.04	2.64
Idem ant. + 0.08 m H° con perlita	0.30	47.04	0.83
Piso cerámico, contrapiso, terreno nat. (Per. 29.8 m)	0.20	47.04	1.38
Puertas (madera de pino)	0.04	1.80	2.29
Ventanas Vidrio simple 6 mm	0.05	10.60	5.70
Vidrio simple con persiana cerrada	0.01	12.80	2.80
Ventilación natural Climatización; 2000 W de H y AC p/zona	G cal	1.72	B:1.71
Idem ant. + Humidificación	(W/m³C)	1.43	C: 2.00
X: 9.30, Y: 4.80, Z: 2.80 - Sup. Cub m ² : 46.08 - c/ muros: 52.52 - Vol. Z1 m ³ : 94.08 - Vol. Z2:37.6			
* muro ídem Casaconv (lindero adosado)			

Tabla 1 Características constructivas de CasaConv y CasaBio

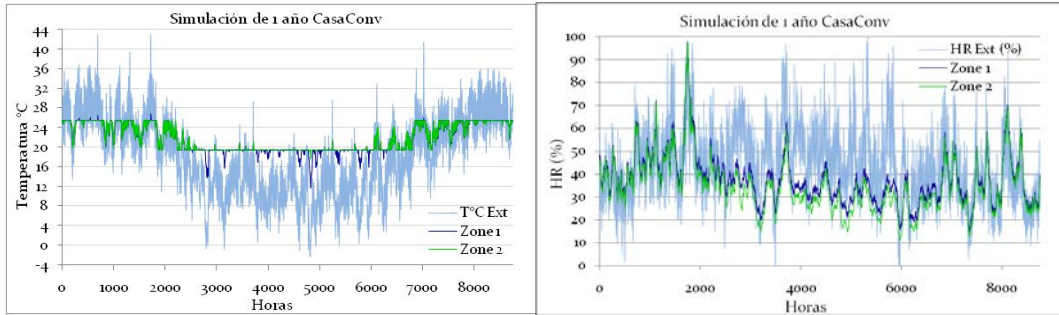


Fig. 2 Simulación de 1 año de la CasaConv con clima exterior

Discomfort Risk Indices			Discomfort Risk Indices			Discomfort Risk Indices		
Index	Unita	Zone 1	Index	Unita	Zone 1	Index	Unita	Zone 1
BTR	[%]	71.5	BTR	[%]	71.5	BTR	[%]	71.5
LOCP	[%]	28.5	LOCP	[%]	28.5	LOCP	[%]	28.5
EDD	[h/a]	24.98	EDD	[h/a]	24.98	EDD	[h/a]	24.98
EUnH	[°C]	17.4	EUnH	[°C]	17.4	EUnH	[°C]	17.4
EOvH	[°C]	27.1	EOvH	[°C]	27.1	EOvH	[°C]	27.1
EUnRH	[%]	25.3	EUnRH	[%]	25.3	EUnRH	[%]	25.3
EOvRH	[%]	77.2	EOvRH	[%]	77.2	EOvRH	[%]	77.2
EDCE	[h]	82	EDCE	[h]	82	EDCE	[h]	82
EDDE	[h]	33	EDDE	[h]	33	EDDE	[h]	33
ELCF	[a ⁻¹]	78.5	ELCF	[a ⁻¹]	78.5	ELCF	[a ⁻¹]	78.5

Fig. 3 Índices de confiabilidad y mapa de confort 3D de la CasaConv zona 1

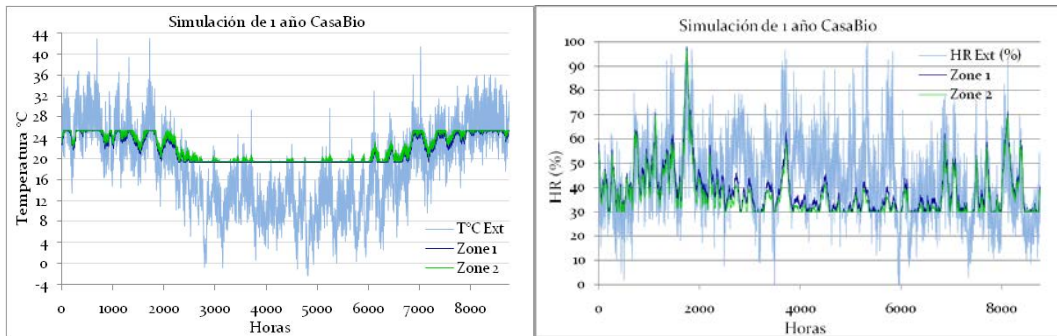


Fig. 4 Simulación de 1 año de la CasaBio con clima exterior

Discomfort Risk Indices			Discomfort Risk Indices			Discomfort Risk Indices		
Index	Unita	Zone 1	Index	Unita	Zone 1	Index	Unita	Zone 1
BTR	[%]	98.5	BTR	[%]	98.5	BTR	[%]	98.5
LOCP	[%]	1.5	LOCP	[%]	1.5	LOCP	[%]	1.5
EDD	[h/a]	1.28	EDD	[h/a]	1.28	EDD	[h/a]	1.28
EUnH	[°C]	18.9	EUnH	[°C]	18.9	EUnH	[°C]	18.9
EOvH	[°C]	28.9	EOvH	[°C]	28.9	EOvH	[°C]	28.9
EUnRH	[%]	NaN	EUnRH	[%]	NaN	EUnRH	[%]	NaN
EOvRH	[%]	77.5	EOvRH	[%]	77.5	EOvRH	[%]	77.5
EDCE	[h]	11.78	EDCE	[h]	11.78	EDCE	[h]	11.78
EDDE	[h]	1.7	EDDE	[h]	1.7	EDDE	[h]	1.7
ELCF	[a ⁻¹]	7.3	ELCF	[a ⁻¹]	7.3	ELCF	[a ⁻¹]	7.3

Fig. 5 Índices de confiabilidad y mapas de confort de CasaBio zona 1

Consumos (kWh/a)		Zona 1	Zona 2	Total	Vivienda	kWh/m ² año	
CasaConv	H	6195	3698	9893	13517	215	293
	AC	2204	1421	3625		79	
CasaBio	H	2650	1335	3985	5450	86	118
	AC	870	595	1465		32	

Tabla 2 Consumos esperados de calefacción *H* y refrigeración *AC* de CasaConv y CasaBio

Referencias Bibliográficas

- EVANS 2010. Consejo Profesional de Arquitectura y Urbanismo CPAU. Sustentabilidad en Arquitectura. pág. 27-30.
- BOLAND, J.; 1997. The importance of the stochastic component of climatic variables in simulating the thermal behavior of domestic dwellings. Solar Energy Vol. 60 (6), 359–366.
- JIANG, Y., Hong T. 1993. Stochastic analysis of building thermal processes. Building & Environment Vol 28, 4, 509-518.
- BZOWSKA, D.; 2002. Thermal behavior of a heated building under random weather condition in Warsaw, Building and Environment Vol. 37, 677 – 689.
- PIETRZYK, K. Probabilistic modelling of air infiltration and heat loss in low-rise buildings. PhD Thesis, School of Architecture, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2000.
- ASHRAE, Standard 55–81, 2005. En Capítulo 8: Thermal Comfort Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- SULAIMAN, H.; 2011. Confiabilidad y economía en la optimización del diseño bioclimático. Tesis Doctoral, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad de Mendoza, Argentina.
- DE WIT, M. 2006. HAMBASE Heat Air and Moisture model for Building And Systems Evaluation: Model & User Guide. Eindhoven University of Technology, the Netherlands.
- IRAM 11601:2002. Aislamiento térmico de edificios. Métodos de Cálculo. Bs As, Argentina.