

EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL RIESGO DE DISCONFORT EN EDIFICIOS.

Halimi Sulaiman¹, Fernando Olsina², C. Filippín³, I. Blasco⁴

Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHA) – Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD)
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) – Av. Ignacio de La Roza y Meglioli – 5400 San Juan – Argentina
Tel.: +54 (0)264 423 2395 / 3259 Int. 349 – Fax: +54 (0)264 423 5397; E-mail: halimi.sulaiman@gmail.com

Recibido: 13/08/12; Aceptado: 01/10/12

RESUMEN: El diseño y la construcción de los edificios determinan junto con el clima y el uso 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 disconfort higrotérmico de cualquier edificación. Mediante simulación estocástica es posible establecer la frecuencia y duración esperada de eventos de disconfort 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 disconfort en el proceso de diseño, se ha determinado el riesgo higrotérmico que presenta de una vivienda convencional climatizada, así como su variante bioclimática.

Palabras clave: diseño térmico, confiabilidad, simulación higrotérmica, Monte Carlo

INTRODUCCIÓN

Debido al creciente impacto que genera el uso de energías convencionales sobre el ambiente, el diseño bioclimático de edificios de bajo consumo energético ha estado recibiendo gran atención en los últimos años por parte de investigadores, arquitectos, ingenieros en climatización y organismos de normalización. El plan estratégico de Argentina busca *procurar un conocimiento y uso sustentable de los recursos renovables y protección del medio ambiente; crear hábitats sustentables haciendo énfasis en el uso racional de la energía, mejorar la calidad y productividad utilizando nuevas tecnologías e industrialización de la construcción de viviendas y obras* (PROTIS, 2006). Ello se debe a que se ha demostrado que los edificios son grandes consumidores de energía en todos los países, esencialmente debido a la operación de los equipos de climatización. En Argentina los edificios representan el 40% de la demanda energética, la cual el 90% proviene de fuentes no renovables (Evans, 2010). Estos consumos pueden disminuirse a través del correcto diseño morfológico espacial, orientación, apropiada selección de envolventes edilicias y de los componentes (Al-Homoud, 2005). Adicionalmente, las estrategias de diseño bioclimáticas (EB) permiten obtener niveles adecuados de confort minimizando el uso de energía convencional (Mazria, 1979).

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 cuya efectividad dependen 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 climática. 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 la 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, tales como los efectos como la inercia térmica en la termodinámica de la edificación. Habitualmente los modelos analíticos son muy eficientes en términos computacionales pero requieren importantes simplificaciones para poder obtener soluciones. En comparación, los modelos simulativos basados en técnicas de Monte Carlo no requieren simplificaciones reteniendo el realismo del problema, sin embargo presentan la desventaja de ser muy intensivos desde el punto de vista computacional (Mechri et al., 2010).

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 se establece la frecuencia y duración esperada de eventos de disconfort en cada local del edificio y el consumo esperado de energía para su climatización, bajo condiciones climáticas aleatorias. Este análisis probabilístico propicia una evaluación apropiada y una comparación entre las variadas

¹ Becaria Posdoctoral CONICET. Doctora en Arquitectura Universidad de Mendoza 2011.

² Investigador Adjunto CONICET. Director Beca Posdoctoral CONICET

³ Investigadora Independiente CONICET. Directora de Tesis Doctoral de la Becaria.

⁴ Investigadora Cat. 1 UNSJ. Co-directora de Tesis Doctoral de la Becaria.

alternativas de diseño. Ello permite además establecer restricciones en el proceso de optimización económica del diseño térmico, evitando el sobre o sub-dimensionamiento de los equipos de climatización, el nivel de aislación en envolventes, la masa térmica o la superficie de captación solar, satisfaciendo indicadores de riesgo de desconfort máximo admisibles. Este artículo se estructura primero presentando los conceptos de confiabilidad y riesgo de desconfort junto con los índices desarrollados y los criterios para la definición de umbrales de estos últimos. Luego se explica cómo se plantean los modelos numéricos realizados para la aplicación de la metodología propuesta y los resultados alcanzados. Seguidamente se analizan las diferencias en el consumo energético por simulación con condiciones determinísticas y estocásticas. Finalmente se sintetizan las principales conclusiones de esta metodología.

CONFIABILIDAD EN EL CONFORT HIGROTÉRMICO Y RIESGO DE DISCONFORT

Se define aquí *Confiabilidad de Confort Higrotérmico* (BTR, siglas en inglés) a la capacidad de un diseño arquitectónico, ya sea bioclimático, convencional o híbrido, de mantener en su interior condiciones preestablecidas de confort higrotérmico, ante fluctuaciones aleatorias del clima exterior. La BTR se puede expresar como la probabilidad que el edificio pueda sostener las condiciones interiores dentro de una región de confort prefijada. El diseño por confiabilidad es ampliamente utilizado para el diseño de sistemas pasivos termo-hidráulicos en instalaciones nucleares (Zio y Pedroni, 2009), en la industria aeroespacial (Epstein et al. 2006), en los sistemas energéticos (Olsina, 2005), el dimensionamiento de estructuras civiles (Lagaros et al. 2010), etc., proponiéndose aquí una extensión de este enfoque al diseño higrotérmico de las edificaciones.

La probabilidad que el edificio satisfaga los requerimientos higrotérmicos dependerá de su diseño morfológico, 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 satisfacer los requerimientos higrotérmicos. Por 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 admisibles para la temperatura y la humedad. El establecimiento de la región de confort se realiza habitualmente de acuerdo a estándares y normas específicas. Ejemplo de ello sería comprobar que un determinado diseño arquitectónico presenta confort un 95% del tiempo, en el cual el 75% de personas se sienten confortables según ASHRAE (2005).

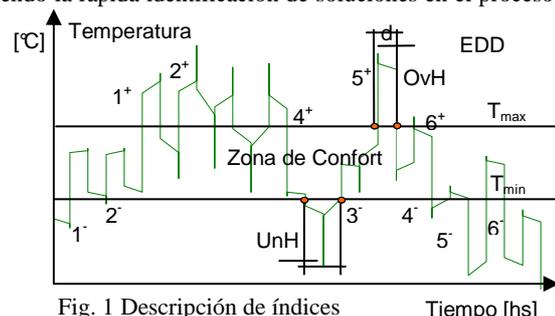
El nivel de exigencia sobre la BTR condicionará las características esenciales del diseño y determinará los costos iniciales del edificio para climatizarlo y el consumo futuro de energía para operar los equipamientos de calefacción y refrigeración. Por tanto el nivel mínimo de confiabilidad debe ser 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 BTR se expresa normalmente como una probabilidad, pero puede también anualizarse, expresando el tiempo esperado anual acumulado en [h/a] que el edificio satisface las condiciones de confort impuestas. A veces es conveniente utilizar el concepto complementario de *Riesgo de Disconfort 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 sólo 2 estados mutuamente exclusivos: aceptable o no aceptable, el RDH se determina conforme a la identidad de complementareidad $BTR + RDH = 1$. Si bien el RDH indica la probabilidad de ocurrencia de eventos de desconfort, 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 desconfort reflejan la magnitud de los desvíos (violaciones) respecto de los límites de la región de confort establecida.

Otros indicadores que, en conjunto con los anteriores, dan una idea más integral del nivel de confiabilidad y riesgo higrotérmico de un determinado diseño arquitectónico son la frecuencia esperada de ocurrencia de eventos de desconfort (LOCF, [1/a]), expresada por ejemplo en ocurrencias por año, y la duración esperada de estos eventos (EDDE, [h/a]). Estos indicadores se relacionan en cuanto a que el diseñador podría evaluar si es preferible admitir en un determinado edificio, mayor cantidad de eventos de desconfort de corta duración y observar los horarios del día en que ocurren los mismos, o bien uno o dos eventos muy prolongados (por ej. 2 o 3 días continuos) que coincidan con periodos sin habitantes en el edificio. El EDDE y LOCF pueden ser desagregados 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 rápida identificación de soluciones en el proceso de optimización del diseño.

La Fig. 1 representa en algunos días los eventos que definen la mayoría de los índices para temperatura. Fuera de la zona de confort (ZC), existen momentos que exceden los límites por sobrecalentamiento (OvH) o que no alcanzan la temperatura mínima (UnH). Ellos poseen una duración d y una desviación desde el límite de la ZC. Los valores esperados de OvH ó UnH corresponden al promedio de estos desvíos sobre el número de muestras simuladas. La media de d determina la duración esperada de eventos de desconfort EDD. La frecuencia, llamada LOCF, es la cantidad media de eventos de desconfort por unidad de tiempo, ej.:



en un año, calculada sobre la muestra simulada.

Criterios para la definición de umbrales

Rango	T (C°)	RH (%)	BTR (%)	RDH (%)	EDD (h/a)	EDDE (hs)	LOCF (1/a)	EUnH (C°)	EOvH (C°)	EUnRH (%)	EOvRH (%)
min.	19	30	95	0	0	0	0	18.9	26.1	29	71
máx.	26	70	100	5	438	5.84	75	15.9	29.1	20	80

Tabla 1. Umbrales propuestos para una vivienda

Dependiendo de los requerimientos higrotérmicos del edificio diseñado, es posible establecer ciertos umbrales para la mayoría de los índices desarrollados. La Tabla 1 ejemplifica los umbrales propuestos para una vivienda convencional en la aplicación realizada. En aquellos casos en que el uso del edificio es continuado, el criterio sería no alejarse demasiado de los límites impuestos (EUnH, EOvH, EUnRH, EOvRH), y tampoco por periodos demasiado prolongados (LOCF). No obstante, se ha establecido el rango de temperaturas y humedad relativa correspondiente al 75% de personas confortables según ASHRAE (2005), abarcando temperaturas entre 19 y 26°C y HR entre 30 y 70%, los cuales pueden considerarse como suficientemente flexibles.

La BTR mínima de 95% significa que las condiciones higrotérmicas interiores deben residir dentro de la zona de confort fijada al menos el 95% del tiempo. Es posible establecer una o más condiciones a la vez: por ejemplo el RDH de 5% equivaldría a un máximo de 438 hs fuera de la ZC (EDD). Se puede tener el criterio de permitir numerosos eventos de desconfort (LOCF), pero de corta duración (EDDE) debido al uso continuo de la vivienda.

MODELOS NUMÉRICOS

Para identificar las posibles ocurrencias de eventos de desconfort que presenta un diseño edilicio bajo un clima determinado 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 de transferencia de calor por conducción, convección y radiación que actúan sobre la edificación y los fenómenos de transporte de masa que atraviesan los límites del sistema (ej.: ventilación y tránsito de personas). Asimismo debe contemplar la acumulación de calor en la masa del edificio (inercia térmica) la cual provoca un amortiguamiento de las condiciones climáticas externas en el ambiente, además de originar un acoplamiento temporal de las condiciones interiores entre intervalos de tiempo vecinos. Idealmente el modelo debe considerar también la interacción que existe entre la temperatura y la humedad relativa, así como también el fenómeno de acumulación e intercambio de calor latente en el mobiliario, cortinado, maderas, etc. Por ser de código abierto se ha utilizado el modelo de simulación HAMBASE (de Wit, 2006) que considera los fenómenos mencionados. Las características del edificio, tales como cantidad de locales, morfología, orientación, materiales, equipos de calefacción y refrigeración y perfiles de uso deben ser introducidas como datos de entrada. El usuario se modela de modo dinámico a través de perfiles de uso detallados (hasta hora a hora de cada día del año para cada local) según las costumbres del lugar (sean ambientalmente conscientes o no), las cuales se combinan con condiciones aleatorias de clima exterior, tales como cerrar persianas cuando la irradiancia exterior (clima sintético estocástico) supera un cierto límite combinado con un límite de temperatura interior. A su vez los equipos se termostatan 0.5 °C antes del límite superior e inferior. Como resultado se obtiene una serie cronológica horaria de temperaturas y humedades en cada local, así como el consumo de energía para climatización.

Para obtener resultados estadísticamente significativos se deben utilizar un gran número de años en la simulación (entre 500 y 1000 años) que permita explorar el comportamiento del edificio bajo eventos climáticos infrecuentes, pero de gran severidad. Conforme a la inclemencia de cada año utilizado en la simulación, será el número, duración y magnitud de los eventos de desconfort que presenta el diseño bajo análisis. 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 observacionales 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.

1. APLICACIÓN EN VIVIENDA EJEMPLO

Para demostrar la aplicabilidad de la metodología propuesta, se evalúa la confiabilidad higrotérmica de una vivienda de construcción y climatización convencional (CasaConv) y la de un diseño modificado bioclimáticamente (CasaBio) considerando el clima de San Juan. La CasaConv (Fig.2) 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 en la orientación E y O, protección solar N y de vientos fríos del sector S, a través de ventanas comunes con persianas. La masa térmica total es de 4.41 kWh/K (zona 1) y 2.19 kWh/K (zona 2), calculado con HAMBASE. Las conductividades, resistencias superficiales, albedo y emisividad de los materiales se establecieron según la Norma IRAM 11601(2002), para lo cual se han introducido materiales con las características necesarias en la base de datos de HAMBASE.

La climatización de la vivienda combina calefacción por tiro balanceado y aire acondicionado Split con humidificador (ambos termostatizados), y estrategias dinámicas de ventilación natural y apertura de persianas. Para la ventilación se define un rango de número de renovaciones horarias máxima y mínima en función de una temperatura interior determinada para cada periodo del día (22°C para este caso). En la apertura de persianas, esta temperatura determinada se utiliza conjugada con el nivel irradiancia exterior predeterminado (400 W/m²).

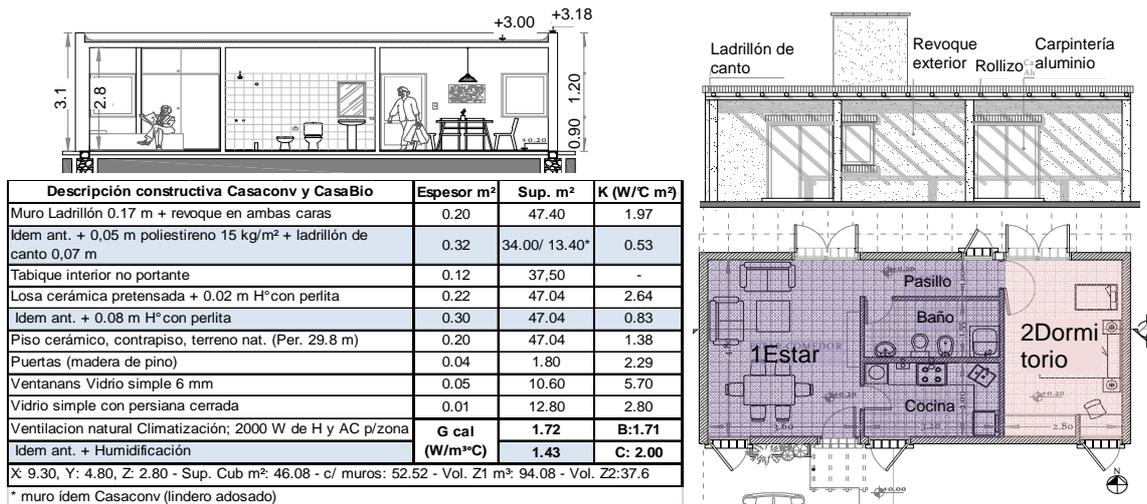


Fig. 2 Planta, Vista Norte y Corte de vivienda, 2 zonas higrotérmicas (1 estar, 2 dormitorio) Descripción de CasaConv y CasaBio

En la Tabla 2 se exponen las características constructivas, transmitancias térmicas K y coeficientes globales de pérdida G calculados, donde se evidencian las diferencias incorporadas en la CasaBio. Las zonas isohigrotérmicas se configuran según el uso principalmente diurno y nocturno. Si bien es posible separar el sector cocina y baño del estar, para la simulación se ha unificado por tener intercambio de condiciones interiores por apertura de puertas entre los ambientes un número elevado de veces al considerar la permanencia de 1 o varias personas simultáneamente en la vivienda durante todo el día.

CasaConv

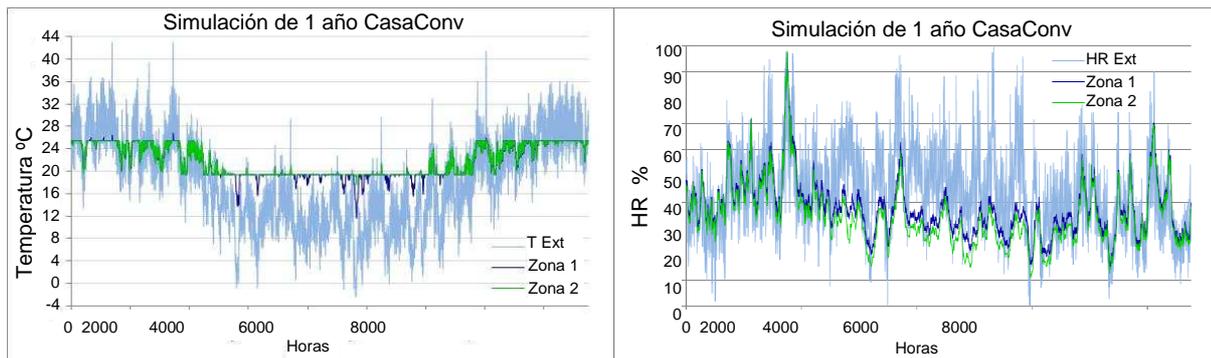


Fig. 3 Simulación de 1 año de la CasaConv con clima exterior

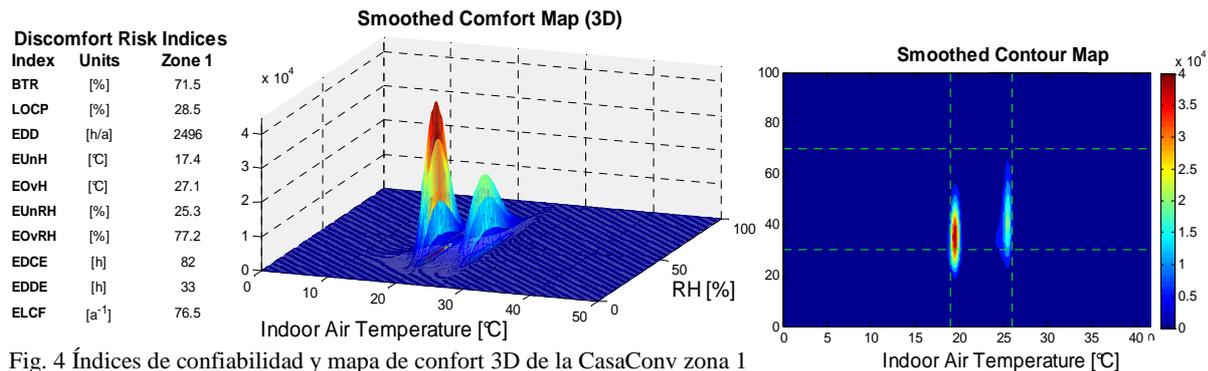


Fig. 4 Índices de confiabilidad y mapa de confort 3D de la CasaConv zona 1

En la Fig. 3 se muestra la simulación horaria de temperaturas y la humedad relativa interiores de la CasaConv, junto con las condiciones exteriores de un año. Si bien las temperaturas son mayormente aceptables, la Zona 1 muchas veces pierde confort durante el invierno, y en menor grado en verano. La humedad relativa por su parte, disminuye en invierno debido a la calefacción, mientras que en verano acompaña los picos exteriores con importante inestabilidad.

Es destacable en la Fig. 4 el bajo nivel de confiabilidad lograda con la climatización convencional (BTR=71.5%, RDH = 28.5%), puesto que existen casi 2500 h/a donde la vivienda no es capaz de sostener condiciones de confort en su interior, sea por alejamiento de los límites de temperatura o humedad relativa, o ambos a la vez. La duración media de los eventos de disconfort (EDDE) es de 33 h y la frecuencia anual de eventos de disconfort (ELCF) es 76.5 a⁻¹. Como se observa en la Fig. 4, el clima interior se distribuye en dos áreas alargadas en los límites inferior y superior de temperatura, abarcando casi todo el rango de HR. La Fig. 5 muestra la convergencia estadística de la estimación del RDH para la CasaConv, donde si bien se

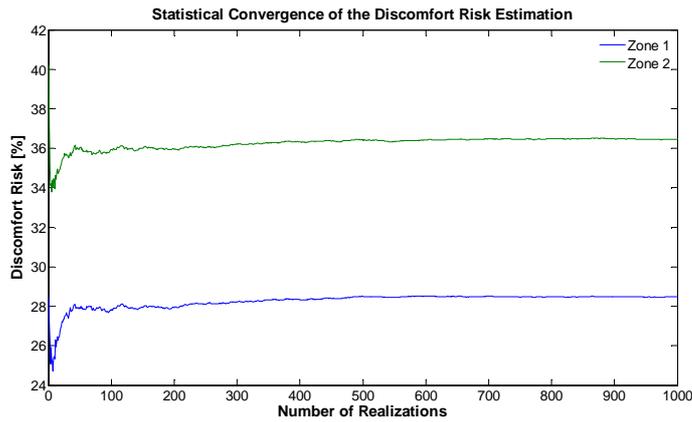


Fig. 5 Convergencia estadística en la RDH de CasaConv

observa una rápida estabilización, se torna necesaria la simulación de por lo menos 500 años. Se subraya además la diferencia en el RDH para cada zona (Zona 1: 28%, Zona 2: 36%).

La Fig. 6 posibilita detectar las deficiencias en el confort higrotérmico de manera precisa y discriminada. En la Zona 1 de la CasaConv, el mayor porcentaje de pérdida de la confiabilidad se debe a la deshumidificación durante el invierno con una probabilidad del 40.9% de encontrarse por debajo del mínimo establecido, logrando una humedad relativa promedio esperada de 32%. En segundo lugar con aproximadamente una probabilidad del 18.5% la temperatura interior en invierno es la causa de discomfort. Sin embargo, si se observa de manera acoplada esta gráfica con el índice EUnH (Fig. 4) la temperatura por debajo de límite, es en promedio de 17.4°C, es decir, sólo 1.6°C por debajo del límite de 19°C. Se podrían modificar patrones considerados constantes como, aumento del abrigo, ganancias internas, actividad, capacidad instalada de calefacción, o bien mejorar la envolvente para conservación de la energía. El valor promedio de las temperaturas interiores durante el invierno es de 19.4°C y la distribución de probabilidades se asemeja a la normal, por lo cual las condiciones de confort son atribuibles al confort principalmente a la climatización, dada la escasa calidad de la envolvente. En cuanto a la humedad relativa se requiere la incorporación de un humidificador para lograr condiciones de humedad dentro de la banda de confort. Observando las probabilidades de estar fuera de la zona de confort, la HR en verano presenta un 6.9% de déficit y supera el valor máximo admisible un 4%. El verano es más confortable aunque la dispersión de temperaturas y humedades es mayor, lo cual provocaría discomfort por amplitud diaria en el interior. La dispersión en la distribución de la HR invernal es menor que en verano, cuando se registran valores entre 10 y 90% con una media esperada de 46%. Como síntesis, la confiabilidad alcanzada es elevada, aunque no suficiente, dada las características constructivas del diseño analizado (envolvente admitida por el código de edificación vigente).

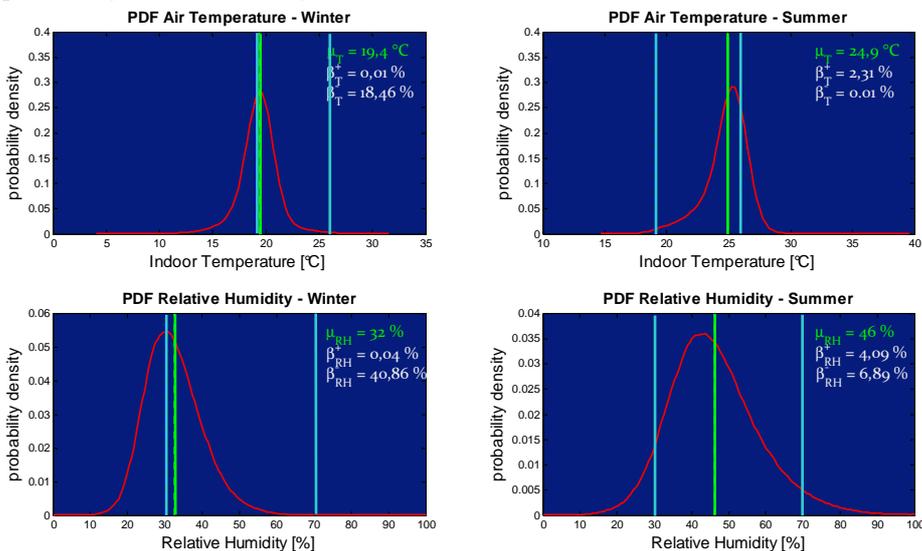


Fig. 6 PDF de temperatura y HR (invierno y verano) de la CasaConv zona 1

CasaBio

Para el mismo año simulado, la Fig. 7 ilustra el comportamiento de las temperaturas y la humedad relativa interiores de la CasaBio. Se observa por un lado, la inexistencia de horas fuera de las temperaturas establecidas, y por otro una humedad 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 HR dado que alcanza el 97% en marzo (día 73), superando el 70% en reiteradas ocasiones. En la Fig. 8 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

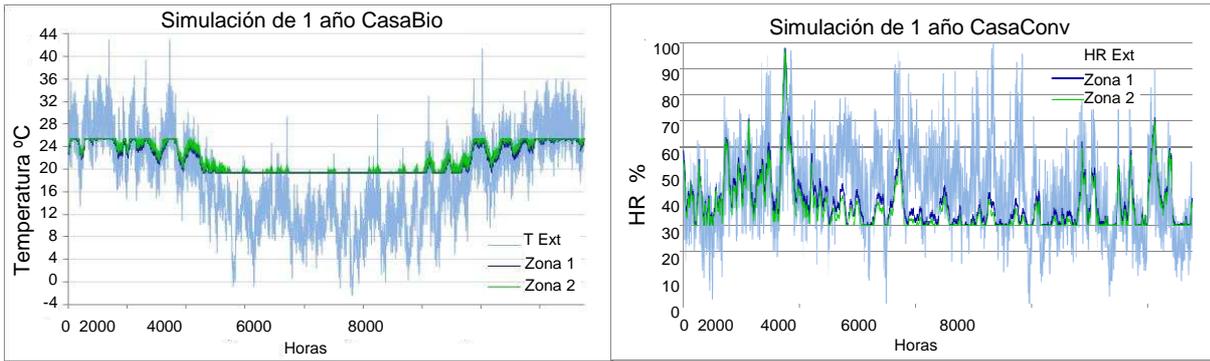


Fig. 3 Simulación de 1 año de la CasaBio con clima exterior

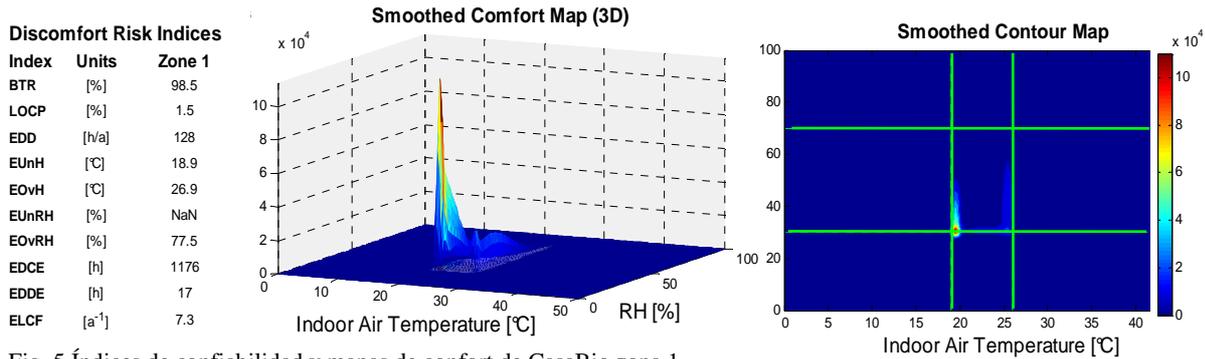


Fig. 5 Índices de confiabilidad y mapas de confort de CasaBio zona 1

humidificador. Los índices muestran que este diseño arquitectónico alcanza un elevado nivel de confiabilidad (BTR 98.5%, con una duración acumulada esperada de eventos de disconfort 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.

En la Fig. 8 los β muestran que en invierno las temperaturas no caen por debajo de 19°C y sólo un 0.07% excede los 26°C en verano, indicando que cumplen en un 99.93% los objetivos propuestos de confort térmico. Los promedios son 19.8°C y 24.9°C en invierno y verano respectivamente. La HR es más del 95.5% del tiempo confortable, mientras que en verano se traspasa el límite superior con una probabilidad del 4.7%. Es posible afirmar que con la incorporación de un deshumidificador, generalmente contenido en el equipo de refrigeración, la BTR podría alcanzar el 100% (ignorando la probabilidad de falla del equipo de AC).

Se demuestra que la metodología propuesta permite cuantificar el riesgo de disconfort ante modificaciones en el diseño higrotérmico. La Tabla 4 muestra los consumos energéticos anuales esperados de ambas viviendas, donde se observa un ahorro energético de 59.9% en la vivienda bioclimática respecto de la convencional.

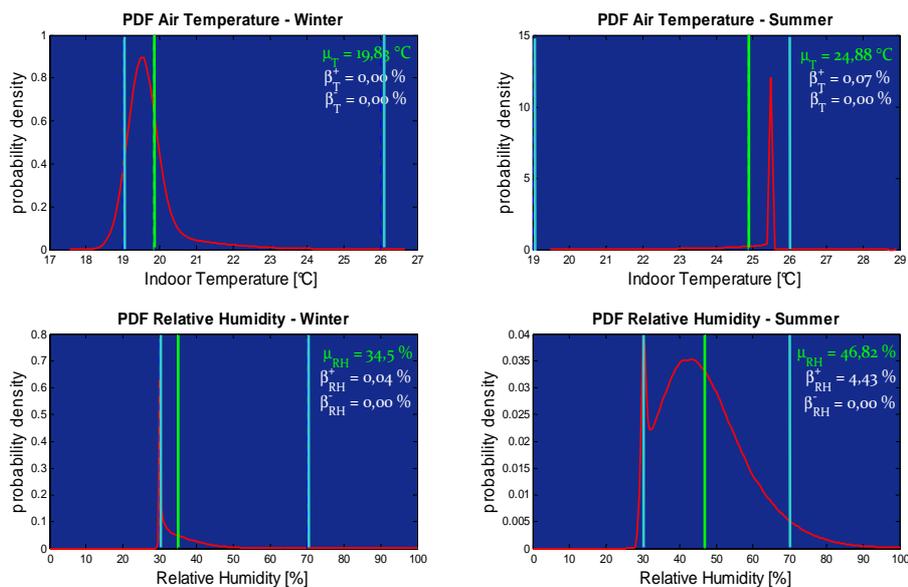


Fig. 8 PDF. μ v β de T v HR para verano e invierno de CasaBio zona

CONSUMO ENERGÉTICO POR SIMULACIÓN CON CONDICIONES DETERMINÍSTICAS Y ESTOCÁSTICAS

Según los antecedentes y estado del arte recopilados en la Tesis Doctoral Sulaiman (2011), no se han encontrado trabajos sobre metodologías probabilísticas que permitan calcular el desempeño higrotérmico al igual que los consumos y sus costos esperados. La bibliografía analizada en optimización de edificios basada en simulación y datos suministrados por el Ing. Nolan de la NREL (2010) Department of Energy de Estados Unidos, afirman que el método mayormente utilizado la simulación anual con frecuencia horaria de un Año Meteorológico Típico (TMY, Typical Meteorological Year). El TMY es un año artificial compuesto por los meses típicos de un total mínimo de 10 años medidos. A través de la simulación horaria con el TMY es posible calcular el confort interior y los consumos para ese año. Sin embargo, no han sido medidos todavía 10 años horarios en la estación San Juan, Argentina de referencia para esta aplicación.

Por ello se elije un año al azar de la serie sintética generada, para simular con HAMBASE las viviendas usadas como ejemplos y se comparan los resultados en las condiciones higrotérmicas interiores al igual que el consumo energético de ese año, con los producidos por la simulación estocástica. En la Tabla 4 se comparan los resultados de consumos energéticos de la simulación de un año correspondientes a las Fig. 2 y 6, CasaConv y CasaBio respectivamente con la simulación estocástica con sHAMS (Sulaiman, 2011) el cual utiliza a HAMBASE. Se calculan los kWh/a m² de calefacción (H) y refrigeración (AC) y la energía total de climatización. La simulación anual con HAMBASE otorga sólo los consumos del edificio completo. Se observa que el año 1 ha sido benigno dentro de la serie climática, tanto en invierno como en verano, generando consumos menores a los esperados con la simulación estocástica de 1000 años. Los casos analizados expuestos al mismo año climático, presentan consumos energéticos diferentes: La CasaConv consume un 27.5% más con simulación de 1000 años, mientras la CasaBio un 23% más. La alta capacidad de conservación de la energía, en un año climáticamente suave, sumado a un rango amplio de confort disminuye significativamente el consumo energético.

El consumo anual por unidad de superficie, con la simulación de 1 año de la CasaBio se puede considerar como de muy bajo consumo con sólo 24 kWh/a m² de AC. Sin embargo, la exposición de la misma a 1000 años horarios muestra como resultado una vivienda de bajo consumo con 47 kWh/a m² de refrigeración, duplicando el consumo frente a la simulación estocástica. Esta diferencia se observa también en la CasaConv, aumentando un 38% de consumo en verano. Esta considerable diferencia en los resultados, es relevante en cuanto a la actual consideración de este índice, el cual puede variar significativamente dependiendo del año de referencia. En cambio, si se lograra simular estocásticamente, construyendo series sintéticas lo suficientemente extensas y precisas en los principales centros urbanos, se tendría una estimación más certera de los consumos esperados durante la vida útil del edificio. A su vez, es relevante considerar que los valores referencia de los parámetros utilizados por las normas como la europea, deberían modificarse, dado que la consideración de 1000 años elevaría los consumos promedios esperados. Desde el punto de vista de esta investigación, los resultados de la simulación de un solo año no otorgan la seguridad suficiente para determinar el riesgo de desconfort y los consumos energéticos esperados, presentando una variación promedio en los mismos de un $\pm 31\%$.

Viviendas	Zona 1		Zona 2		Consumo total									
	H	AC	H	AC	H	AC	total	kWh/a m ² H	kWh/a m ² AC	kWh/a m ²				
1 año					7854	2702	10556	170	59	229				
					3108	1103	4211	67	24	91				
1000 años					6150		3697	1421	9847	3622	13469	214	79	292
					2074	1314	941	836	3015	2150	5165	65	47	112

Tabla 4. Consumos energéticos totales y por unidad de superficie con simulación de 1 y 1000

CONCLUSIONES

Este trabajo propone una metodología para evaluar cuantitativamente la confiabilidad higrotérmica que posee un diseño edilicio, basada en simulación estocástica del comportamiento higrotérmico de la edificación. La metodología propuesta permite cuantificar la incertidumbre de las condiciones interiores y el riesgo de desconfort del edificio bajo consideración de la naturaleza aleatoria del clima exterior. Del mismo modo se pueden cuantificar los consumos energéticos esperados por climatización durante la vida útil del edificio. 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 higrotérmico del edificio y la optimización del mismo. La metodología no se encuentra limitada por el hecho que en el ejemplo, el comportamiento de los usuarios este en alguna forma simplificado. Modelos detallados del comportamiento del usuario, su respuesta endógena a las condiciones interiores y exteriores, y la incertidumbre que afecta al comportamiento de los mismos, pueden ser fácilmente integrados a la metodología probabilística presentada.

La metodología propuesta ha exigido el desarrollo de rutinas computacionales y de bases de datos climáticas para su implementación, no sólo para la aplicación que aquí se concreta, sino para trabajos futuros. Con este propósito se ha programado un modelo de simulación estocástica llamado sHAMS (stochastic Heat And Moisture simulation), a través del cual es posible determinar cuán confiable y confortable es un edificio (bioclimático, híbrido o convencional) y que riesgo de desconfort que presenta bajo la variabilidad de las condiciones climáticas en el sitio de implantación. sHAMS se sustenta en la misma plataforma (MatLab) que el programa de simulación higrotérmico utilizado, HAMBASE, lo cual ha permitido la integración de ambos, el tratamiento de datos de entrada y salida en otros formatos de uso cotidiano y el procesamiento de los resultados de forma gráfica, facilitando la interpretación de los mismos. A su vez, la metodología brinda la posibilidad de

incorporar otros módulos independientes para ampliar y profundizar el análisis higrotérmico-económico de edificios con el propósito de la aplicación de optimización numérica en Arquitectura.

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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Homoud, M. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, Vol. 40, 351–364.
- ASHRAE (2005). Standard 55–81. Capítulo 8: Thermal Comfort Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- 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.
- Bzowska, D. (2002). Thermal behavior of a heated building under random weather condition in Warsaw, *Building and Environment*. Vol. 37, 677 – 689.
- De Wit, M. (2006). HAMBASE Heat Air and Moisture model for Building And Systems Evaluation: Model & User Guide. Eindhoven University of Technology, the Netherlands.
- Epstein B., Peigin S., Tsach S. (2006). A new efficient technology of aerodynamic design based on CFD driven optimization *Aerospace Science and Technology* 10: 100-110.
- Evans J. (2010). Sustentabilidad en Arquitectura. pág. 27-30. CPAU. Bs. As.
- IRAM 11601 (2002). Aislamiento térmico de edificios. Métodos de Cálculo. Bs As, Argentina.
- Jiang, Y., Hong T. (1993). Stochastic analysis of building thermal processes. *Building & Environment* Vol 28, 4, 509-518.
- Lagaros N.D., Garavelas A. Th., Papadarakakis M. 2008. Innovative seismic design optimization with reliability constraints. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 198 28-41.
- Mazria, E. (1979). The Passive solar energy book. A complete guide to passive solar home, greenhouse and building design. PA, USA: Emaus. Traducción al castellano por Dr. Arq. Rafael Serra Florensa, 1984, Sevilla.
- Mechri H. et al. (2010). Use of the ANOVA approach for sensitive building energy design. *Applied Energy*, Vol 87(10), 3073-3083.
- Olsina F. 2005. Long-term Dynamics of Liberalized Electricity Markets Ph.D. Dissertation Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan.
- 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.
- PROTIS (2006). Plan Estratégico Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación “Bicentenario” 2006-2010. Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (SECyT), Argentina.
- Sulaiman, H. (2011). Confiabilidad y Economía en la Optimización del Diseño Bioclimático .Tesis Doctoral, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad de Mendoza.
- Zio E., Pedroni N. (2009). Building confidence in the reliability assessment of thermal-hydraulic passive systems. *Reliability Engineering and System Safety* 94: 268- 281.

ABSTRACT

Along with the outdoor climate and the use, 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 illustrates the proposed approach in the design process, the comfort risk of a residential house conventionally acclimatized and a bioclimatic variant is assessed.

Keywords: thermal building design, reliability, higrothermal simulation, Monte Carlo