

OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA BIVARIADA DEL DISEÑO HIGROTÉRMICO DE EDIFICIOS CON RESTRICCIONES DE CONFIABILIDAD

H. Sulaiman¹, F. Olsina², I. Blasco³, C. Filippín⁴

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: 02/10/12

RESUMEN: Este trabajo presenta una nueva metodología de optimización del diseño higrotérmico por confiabilidad. La misma realiza la optimización bivariada del espesor de la aislación térmica de las envolventes, y la masa de acumulación en muros exteriores de un proyecto de una vivienda en San Juan durante su vida útil, incorporando restricciones de confiabilidad del desempeño térmico de la edificación expresadas en términos de valores máximos admisibles para la probabilidad de ocurrencia de eventos de desconfort. Su implementación se lleva a cabo simulando 300 años el comportamiento higrotérmico de 100 combinaciones de diseños bajo la incertidumbre que introducen las fluctuaciones aleatorias del clima exterior. De esta manera es posible cuantificar las condiciones higrotérmicas y consumos energéticos esperados de cada local del edificio. Los costos de materiales, mano de obra y energía corresponden a enero de 2011. Se calculan los sobrecostos anualizados de inversión que se adicionan al costo anual esperado de calefacción y refrigeración. A su vez se realizan análisis de sensibilidad al aumento en los costos energéticos de climatización, mayor exigencia en el confort y a la tasa de descuento. Se detallan alcances y limitaciones de la investigación.

Palabras clave: simulación higrotérmica, optimización económica, riesgo de desconfort, Monte Carlo.

INTRODUCCIÓN

Debido al aumento del costo de la energía y los crecientes problemas ambientales, optimizar el diseño con un enfoque sustentable es cada vez más importante en todo el mundo. La industria de la construcción consume el 50% de los recursos mundiales (Edwards, 2001). En Argentina los edificios representan el 40% de demanda energética, de la cual el 90% de la energía consumida proviene de fuentes no renovables (Evans, 2010). Ante esta realidad y considerando que las decisiones de diseño y construcción actuales influyen en los próximos 50 años o más, es importante disponer hoy de herramientas para optimizar el diseño térmico-energético de las edificaciones con el propósito de lograr soluciones de bajo consumo energético sin comprometer el nivel de confort que el edificio brinda.

El uso de herramientas de simulación en el campo de la Arquitectura y la Ingeniería es ya habitual para crear realidad virtual, describir el comportamiento de las estructuras, analizar el desempeño térmico-energético, la iluminación, la acústica, etc. Se ha reconocido que los programas de simulación térmica son esenciales en el proceso de diseño de la edificación sustentable (NREL, 2006). Éstos se utilizan para encontrar mejores diseños, lo cual normalmente se realiza intuitivamente en forma manual porque carecen de procedimientos automatizados que permitan explorar un gran número de diseños (Al-Homoud 1998, Wang 2005, Ellis 2006).

Al principio, en las rutinas de optimización para el diseño de edificios no se incluía simulación, por un lado, porque los métodos provienen de otras áreas del conocimiento y por otro, dada la complejidad, no era factible con el escaso poder de cálculo de las computadoras en comparación con las actuales. En los últimos 15 años se ha extendido en el diseño higrotérmico la *Optimización basada en Simulación*, la cual integra rutinas de optimización de forma automática con modelos de simulación (Wang 2005; Caldas y Norford 2002; Wetter, 2004). Si bien estos autores incorporan métodos metaheurísticos, la mayoría de los problemas de optimización del diseño están formulados como determinísticos, ignorando incertidumbres involucradas (por Ej.: las introducidas por el clima y el uso del edificio) y las implicancias que tienen en la dinámica del edificio. A su vez, las aplicaciones varían desde complejos simuladores que insumen importante tiempo de cálculo (GenOpt), realizables sólo en laboratorios, soluciones predeterminadas (BEopt) o modelos sencillos programados para el optimizador que requieren simplificaciones en el modelo termodinámico del edificio (Kumar *et al.*, 2008).

Lagaros, (2008) desarrolla un procedimiento de optimización del diseño sísmico de estructuras con restricciones de confiabilidad. En el aspecto térmico de los edificios, Pietrzyk (2000) crea un modelo probabilístico *analítico* para estimar la infiltración de aire y las pérdidas de calor en edificios de baja altura, pero no considera la inercia térmica y no realiza optimización del diseño. Por otro lado, los métodos de simulación estocástica (Monte Carlo) caracterizan y cuantifican la incertidumbre de la respuesta de un sistema. Se considera el más apropiado porque permite modelar el comportamiento del sistema de manera detallada y evaluarlo ante un gran espectro de posibles condiciones. No obstante requiere considerable tiempo de cálculo (Lagaros, 2008). El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para la optimización económica del diseño higrotérmico con restricciones de confiabilidad integrando tecnologías bioclimáticas y convencionales de climatización, que permita garantizar eficiencia económico-energética y confiabilidad de confort higrotérmico incorporando la incertidumbre de las variaciones aleatorias del clima sobre el desempeño térmico del edificio (Sulaiman, 2011).

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

² Investigador CONICET. Instituto de Energía Eléctrica (UNSJ).

³ Investigadora UNSJ Categoría I. Co-Directora de Tesis de la Becaria.

⁴ Investigadora Independiente CONICET. Directora de Tesis Doctoral de la Becaria.

Este artículo se organiza primero presentando conceptualmente la metodología donde formula el problema de optimización a resolver, sus componentes de costo y las restricciones de confiabilidad. Seguidamente se exponen los resultados de una aplicación concreta de una vivienda en un tiempo y contexto determinado. Estos resultados se comparan con los generados por la simulación estocástica de la misma vivienda con envolvente convencional (CasaConv) y su variante bioclimática (CasaBio). Luego se exponen los tres casos a diferentes análisis de sensibilidad y se discuten los resultados. Finalmente se sintetizan las principales conclusiones de la metodología propuesta.

METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO HIGROTÉRMICO DE UN EDIFICIO

El diseño arquitectónico de un edificio, entendiéndose como tal al conjunto de todos los parámetros que lo definen (dimensiones, morfología, orientación, materiales, envolventes, aventanamientos, etc.), determina los costos iniciales de construcción, como así también los costos en que se deberá incurrir en el futuro para su climatización. Las distintas alternativas de diseño presentan una estructura de costos de inversión y costos energéticos muy diferentes. Algunas propuestas pueden involucrar mayores costos iniciales (Ej.: aislación de envolventes, mejores aberturas) lográndose un ahorro energético durante la vida útil del edificio. Otras alternativas pueden ser mucho más económicas en términos del desembolso inicial, a costa de tener mayores gastos de climatización en el futuro. El problema de diseño es combinatorio dado el inmenso número de variantes que pueden imaginarse para un edificio, cada una con un costo global distinto. Precisamente el propósito de optimizar es encontrar aquella combinación, en el vasto espacio de posibilidades, que resulta en el mínimo costo total. Encontrar la solución óptima en un espacio combinatorio, actualmente continúa siendo un desafío y es objeto de permanente investigación (Wetter, 2004).

Matemáticamente, el problema de optimización se reduce a encontrar el mínimo de la función de costos. La misma, llamada función objetivo en la terminología propia de la teoría de optimización, deberá expresarse en términos de las variables de diseño que ofrecen libertad para ser modificadas (Ej.: el espesor de la aislación, la magnitud de la masa térmica, la dimensión de las aberturas). Algunas variables de diseño son continuas, pudiendo adquirir cualquier valor dentro de cierto rango (Ej.: ángulo de orientación, altura del edificio), otras serán discretas pudiendo adquirir solo ciertos valores (ej.: número de ventanas, posibles anchos de muros dadas las dimensiones de los ladrillos comerciales, espesor de la aislación, etc.). Algunas decisiones de diseño serán además binarias, es decir del tipo SI/NO (Ej.: instalar aberturas con vidrio simple o vidrio doble). Por último, para una combinación definida de estas variables de diseño, los costos energéticos anuales resultantes sólo pueden estimarse con aproximación, ya que dependen de la severidad del clima de cada año. Por ello es necesario analizar una muestra de numerosos años, para poder establecer tanto el consumo esperado de energía, como su rango de variación.

Con el objeto de posibilitar una comparación adecuada de diversos diseños, es necesario establecer criterios de desempeño mínimo de confort interior, los cuales deben satisfacer necesariamente cada una de las alternativas evaluadas. Esto conduce a fijar restricciones de desigualdad al problema de optimización. La ausencia de estas restricciones llevaría a seleccionar casos muy económicos, pero de pobre o inaceptable performance. En este trabajo se propone como criterio (para todo diseño), limitar la probabilidad de ocurrencia de eventos de desconfort a un valor máximo admisible. El riesgo que el edificio sea incapaz de sostener condiciones interiores dentro de la zona de confort (RDH) depende de los parámetros de diseño seleccionados. Algunas soluciones, como por ejemplo aquellas con espesor de muros muy delgados, o envolventes de materiales con alta transmisividad, a pesar de ser económicas, excederán el riesgo de desconfort máximo admisible, quedando así descartadas. El problema de optimización puede formularse matemáticamente como lo expresan las ecuaciones 1 y 2:

$$C_T(x^*) = \min_x \mathbb{E}[C_T(x)] \quad (\text{función objetivo o función de costos}) \quad (1)$$

sujeto a:

$$r(x) \leq R \quad \forall x \quad (\text{restricción de riesgo o confiabilidad}) \quad (2)$$

donde $\mathbb{E}[C_T(x)]$ es el valor esperado de los costos totales de climatización, expresados en valor presente y denotado como C_T (comprendiendo costos iniciales de inversión y costos futuros de energía); x es el vector de variables de decisión del problema formado por cada una de las posibles variantes de diseño, siendo x^* la solución óptima, constituida por la combinación de variables que produce el diseño de mínimo costo total; $r(x)$ es el riesgo de desconfort higrotérmico (RDH) para la combinación x y R la probabilidad máxima admisible fijada para la ocurrencia de eventos de desconfort.

El valor presente de los costos esperados totales $\mathbb{E}[C_T(x)]$ pueden descomponerse en una suma de gastos esperados C_t , descontados a una tasa ρ , que ocurren en distintos intervalos de tiempo t , incluyendo el costo inicial de inversión $C(x)$ que se desembolsa en el instante inicial t_0 , y los costos energéticos $CE(x)$ anuales que se incurren desde el año 1 hasta el fin de la vida útil del edificio, denotada como T , conforme lo indicado mediante la fórmula 3:

$$\mathbb{E}[C_T(x)] = \mathbb{E}\left[\sum_{t=0}^{T-1} \frac{C_t(x)}{(1+\rho)^t}\right] = C(x) + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{\mathbb{E}[CE(x)]}{(1+\rho)^t} \quad (3)$$

Si se asume constante el costo energético de climatización en el periodo considerado, la ecuación anterior puede expresarse más convenientemente como una anualidad C_T^A , de valor presente equivalente según la fórmula 4:

$$\mathbb{E}[C_T^A(x)] = \frac{C(x)}{1-(1+\rho)^{-T}} + \mathbb{E}[CE(x)] \quad (4)$$

Es importante notar que la única variable aleatoria que interviene es el costo energético anual, el cual puede ser para cada año computado como el producto del precio p de la energía por la cantidad anual de energía consumida E para climatizar el diseño x , tal que $\mathbb{E}[CE(x)] = p\mathbb{E}[E(x)]$. Si se utilizan distintas fuentes de energía para la provisión de calefacción y refrigeración (Ej.: gas y electricidad), hay que discriminar el consumo de ambas a fin de valuarlas con los precios

correspondientes. Asimismo, debe ser tenido en cuenta el rendimiento de los respectivos equipos. Para un diseño \mathbf{x} , el valor esperado del consumo anual de energía para la climatización del edificio se estima como la media aritmética de una muestra de consumos anuales $E_t(\mathbf{x})$, obtenidas de la simulación cronológica horaria del comportamiento higrotérmico del edificio para N posibles realizaciones de la meteorología anual:

$$\hat{E}[E(\mathbf{x})] = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N E_t(\mathbf{x}) \quad (5)$$

La misma simulación estocástica de N cronologías anuales de las condiciones en el interior del edificio, permite estimar la cantidad de horas h en que la temperatura y humedad relativa se encuentran fuera de la región de confort fijada. Para ello se aplican los métodos y modelos desarrollados en investigación previa para el análisis de la evolución del riesgo de discomfort (Sulaiman, 2011), el cual expresado como una probabilidad se estima según la ecuación 6:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{h}{8760N} \quad (6)$$

El costo de inversión incremental en climatización $CI(\mathbf{x})$ se parametriza en función de las variables de diseño. Este costo incluye los respectivos de materiales, transporte y mano de obra para la construcción de muros y estructuras, considerando las particularidades que correspondan a la tecnología de envolvente seleccionada (Ej.: revoques, refuerzos, protección mecánica exterior, etc.). Es posible incluir aquí un costo anual de mantenimiento, el cual en general dependerá del diseño evaluado. Para el cálculo de la inversión en envolventes verticales y horizontales se ha aplicado la metodología de costos unitarios PROMETE-U (Sulaiman *et al.*, 2010). Se deben adicionar los costos incrementales de aberturas, así como también los costos de adquisición e instalación de los equipos de climatización.

Principales diferencias con otros métodos de análisis de costos

- El cálculo de los costos incrementales de inversión reducidos a unidad, discriminado por capa permite su reutilización en otras optimizaciones, tanto en modificaciones de la tecnología constructiva a optimizar, como en tecnologías de envolventes distintas y en otros edificios o tipos de edificios que utilicen ese sistema constructivo o alguna de sus capas.
- Esta división del análisis por capas o elementos, permite identificar qué ítems incorporan mayores costos, pudiendo modificar los mismos o bien discriminar cuales corresponde considerar como costos fijos y cuales son incrementales.
- Los mismos son actualizables según el lugar y momento de la aplicación.
- El costo anualizado se calcula con una ecuación sencilla, contempla los costos de inversión y mantenimiento durante la vida útil del edificio, inclusive con distinta vida útil entre sí y comparar otras tecnologías o combinaciones de las mismas.
- Una diferencia considerable respecto inclusive con el análisis de costos de ciclo de vida, es la posibilidad de calcular toda la distribución de los costos energéticos e incorporar en el cálculo, el valor de consumo anual esperado y su distribución, permitiendo derivar la incertidumbre sobre los costos totales de climatización.

Método de solución

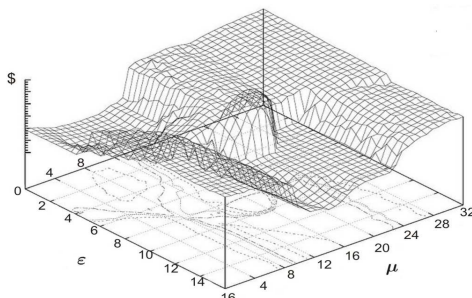


Fig. 1 Ejemplo teórico de optimización del espesor de la aislación en envolventes y espesor

El método de solución adoptado es la Evaluación Exhaustiva Bivariada (Chiang, 1996), que consiste en optimizar de a dos variables por vez, analizando todas las soluciones posibles dentro de un campo bidimensional discretizado (dominio de la función o espacio de búsqueda). De este modo se construye una gráfica en 3D donde los eje x e y corresponden al rango de valores que puede tomar cada variable de diseño. Este espacio debe ser lo suficientemente amplio para evitar caer en óptimos locales, dejando de lado opciones mejores sin evaluar. El eje z es el costo global por climatización (inversión incremental + costo energético) de las diferentes combinaciones, donde el mínimo valor corresponde al diseño óptimo (Fig.1). Si bien esta metodología requiere el cálculo y simulación de cada combinación de diseño, otorga al arquitecto un panorama completo del comportamiento de los costos respecto de las variaciones de los parámetros arquitectónicos del edificio

que se está optimizando. Se puede evaluar y considerar opciones cercanas al óptimo, las cuales por otras cualidades no incluidas en la optimización realizada (como practicidad constructiva, accesibilidad de los materiales locales y/o medidas comerciales, aspectos estéticos, normativas vigentes, etc.) pueden ser una mejor opción en la realidad. Existe la posibilidad de modificar una variable en uno o todos los lugares de aplicación y así evaluar de un modo completo el impacto de la misma en el desempeño del edificio. Ejemplos en la formulación de una de las dos variables de optimización son:

1. Variación simultánea del espesor de la aislación en la envolvente vertical y cubierta en simultáneo con diferente parámetro inicial (por Ej. cero en muros y 0.02 m en cubierta)
2. Aumento del espesor de muros y pisos (interiores y/o exteriores aledaños) con sus respectivos espesores mínimos según normativas vigentes.
3. Crecimiento paulatino de la capacidad instalada en todos los locales con diferente nivel inicial según la zona.
4. Cantidad o superficie de áreas captadoras en todas o sólo algunas orientaciones, etc.

Citando a Al-Homoud (2004), la mayor o menor exactitud en la definición de la función objetivo incide directamente en la aplicabilidad de los resultados de la optimización en las decisiones de diseño arquitectónico. El planteo de estos ejemplos pretende mostrar que, si bien la metodología bivariada posee la limitación de evaluar sólo dos variables simultáneamente, la

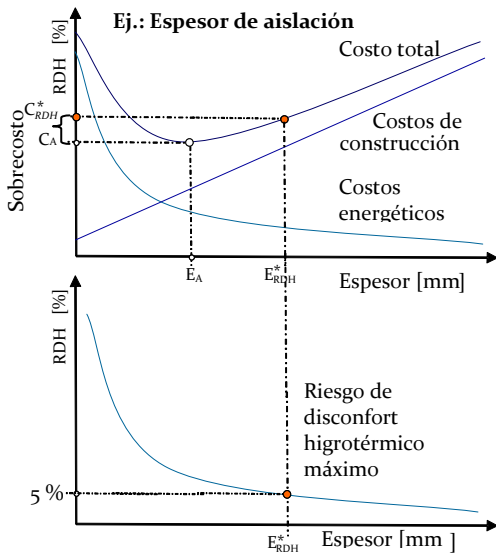


Fig. 2 Influencia del RDH en la determinación del óptimo

formulación más precisa posibilita abarcar otros aspectos del diseño estrechamente relacionados. Todas las formulaciones ejemplo podrían efectuarse simultáneamente requiriendo necesariamente una importante capacidad de cálculo computacional. No obstante, la metodología permite efectuar la optimización bivariada de modo secuencial. Se realiza en el siguiente apartado, una optimización de dos de las principales variables de diseño higrotérmico de edificios, donde se detalla el rango de valores evaluados. Las demás variables como orientación, volumen, proporciones, tipo de envolvente, etc. se mantienen constantes, teniendo en cuenta las recomendaciones del diseño bioclimático, al igual que tecnologías y uso detallado del edificio apropiadas al lugar de aplicación. La Fig. 1 es un ejemplo de combinación de diseños de las variables espesor de la aislación en la envolvente y espesor de muros para aumentar la masa térmica en un edificio, donde los valores definidos del dominio corresponden a posibles soluciones constructivas.

Riesgo de discomfort (RDH) como restricción

Cumpliendo restricciones de diseño, como presupuesto y nivel máximo admisible de RDH, existe un compromiso económico entre costos elevados de inversión y bajos costos futuros de energía por operación. La Fig. 2 muestra de modo esquematizado el planteo propuesto donde se incorpora el RDH en la elección del óptimo en los

costos totales, modificando la estructura o combinación entre los mismos por inversión y operación. Se establece un RDH máximo admisible, por ejemplo del 5% que deberían cumplir todos los posibles diseños del edificio evaluado. Es probable que esta restricción eleve los costos totales y modifique la proporción de costos de inversión y los costos de energía consumida durante la vida útil de edificio, generando un sobrecosto por confiabilidad de confort higrotérmico. De esta manera el Óptimo por Confiabilidad corresponde a una nueva combinación de diseño óptima E_{RDH}^* .

OPTIMIZACIÓN DE LA MASA DE ACUMULACIÓN Y LA AISLACIÓN TÉRMICA

Se realiza la optimización bivariada de 100 diseños simulados, del espesor de la aislación térmica en la cubierta y los muros, y el aumento de la masa de acumulación por espesor de muros exteriores en una vivienda (Fig 3). El desempeño térmico de cada diseño y el consumo de energía se ha evaluado para 300 posibles series meteorológicas anuales horarias. A su vez se la compara con la misma vivienda con envolvente convencional (CasaConv) y mejorada bioclimáticamente (CasaBio) resaltado con color en la descripción constructiva. Los parámetros utilizados corresponden a San Juan, enero 2011 (Fig. 4). El usuario se ha considerado de modo dinámico a través de perfiles de uso detallados según las costumbres locales ambientalmente conscientes, las cuales se combinan con condiciones aleatorias de clima exterior. 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 celosías, esta temperatura determinada se utiliza conjugada con la irradiancia exterior predeterminada (400 W/m²).

El precio unitario del gas para calefacción es 0.185 AR\$/m³ y 0.30 AR\$/kWh de electricidad. Los resultados numéricos sirven para ilustrar la practicabilidad de la metodología propuesta. El óptimo depende de las condiciones de diseño y el contexto que se establezcan, siendo probable otros resultados óptimos en contextos diferentes como el actual. El tiempo de simulación total ha sido 26 h (14.9 min cada uno). Una simulación del comportamiento horario del edificio durante 1 año insume poco más de 30 s, minimizando el problema de rapidez de cómputo planteado en la introducción. La Fig. 4 grafica los costos calculados por muros y aislación en muros y cubierta considerados en la aplicación realizada. La aislación en muros (poliuretano 15 Kg/m²) contiene el costo por protección mecánica (ladrillón de canto). Los revoques no son costos incrementales. La aislación en cubierta es hormigón alivianado con perlita. Es importante destacar la posibilidad de detectar

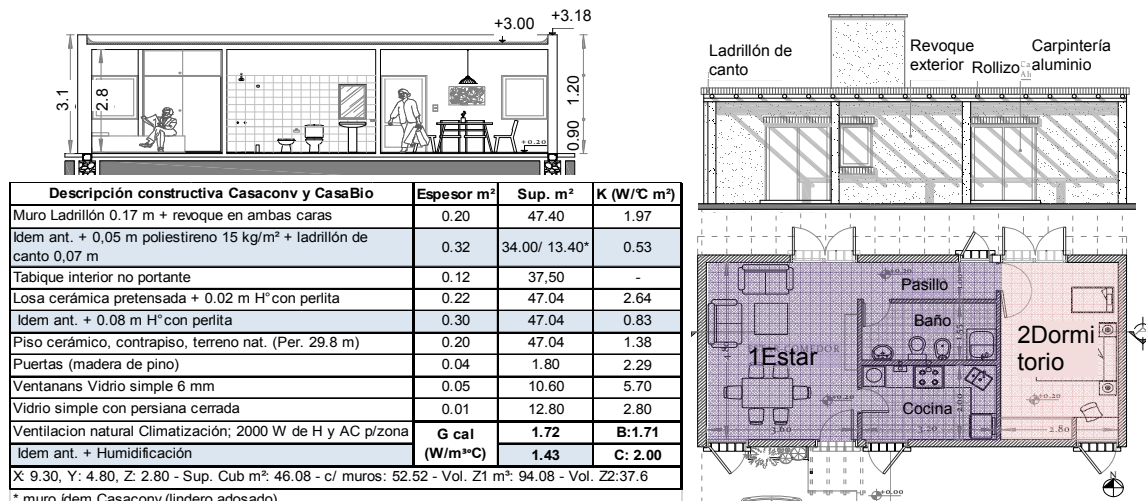


Fig. 3 Planta, Vista Norte y Corte de vivienda, 2 zonas higrotérmicas (1 estar, 2 dormitorio) Descripción de CasaConv y CasaBio

la mejor opción para otros espesores de muros superior a los 0.10 m, en el caso de ser requerido en el diseño arquitectónico por otros motivos. En la presente optimización se recomienda disminuir la aislación un centímetro sólo en muros de 0.50 m, manteniéndose el espesor de aislación de la opción óptima en las demás alternativas de muro evaluadas.

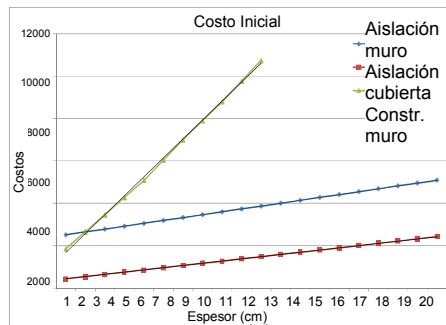


Fig. 4 Costos de inversión del aumento de espesor de muro v aislaciones de Design Cost Map (2D)

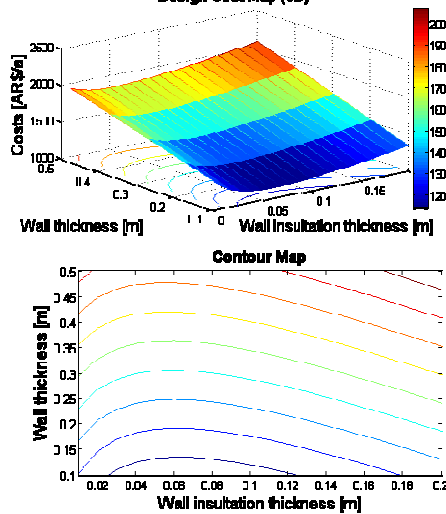


Fig. 5 Mapas de Costos de los 100 diseños evaluados (espesor de muro y aislaciones)

Diseño ID	CasaOpt	CasaConv	CasaBio
Aislación muros	0.07	0.00	0.05
Aislación cubierta	0.08	0.02	0.10
Espesor muros	0.10	0.20	0.20
RDH Zona 1 (%)	1.41	8.30	1.41
RDH Zona 2 (%)	1.11	1.30	1.11
Costo H Zona 1	50.73	113.78	49.02
Costo AC Zona 1	266.25	660.59	261.09
Costo T Zona 1	316.98	774.37	310.11
Costo H Zona 2	24.79	68.41	24.70
Costo AC Zona 2	177.56	426.33	178.46
Costo T Zona 2	202.35	494.74	203.16
Costo E (AR\$/a)	519.33	1269.11	513.27
Aislación muros	349.02	0.00	317.88
Aislación cubierta	118.14	54.89	139.20
Espesor muros	226.98	411.11	411.11
Inversión (AR\$/a)	694.14	466.00	868.19
Costo Global	1213.47	1735.11	1381.46

Tabla 2 Costos CasaOpt, CasaConv CasaBio

aunque la zona 2 responde satisfactoriamente a los requerimientos de confort (Z2: 98.7%). Respecto de la CasaOpt y la CasaBio, donde se esperan los mismos riesgos mínimos (RDH de 1.41% en Z1 y 1.11% en Z2), la Z1 de la CasaConv es 83% más riesgosa. La incorporación de un humidificador en la vivienda convencional permitiría disminuir notablemente el desconfort, y probablemente alcanzara el mínimo CCH ajustando la CIC en Z1, sin mejorar las envolventes. La duración total esperada de eventos de desconfort EDD de la CasaConv son 731 h/a en Z1 (antes 2496 h/a) y 119 h/a en Z2 (antes 3195 h/a). Es interesante observar las diferencias constructivas en los muros entre las viviendas comparadas. A simple vista, se podría decir que las mismas no son realmente importantes, si se considera que la CasaBio adiciona aislación y su respectiva protección al muro convencional, siendo el espesor de aislación 0.02 m menor que en la CasaOpt. Sin embargo, existen dos aspectos fundamentales que inciden en los incrementos de los costos globales: 1- la incorporación de aislación en la

La Fig. 5 representa los valores monetarios correspondientes a los sobrecostos anuales esperados por climatización de todo el espectro evaluado, en base a precios del mercado local. El eje x corresponde al espesor de muro (m), el eje y al espesor de aislación en muros y los costos incrementales anualizados (AR\$/a) en el eje z. Para cumplir con las altas exigencias de confiabilidad impuestas (95%), los resultados varían entre AR\$/a 1213.5 (diseño óptimo) a AR\$/a 2116. Se verifica que la inversión destinada a aislación de envolventes es recomendable, dado que por cada peso invertido en este ítem, el beneficio es mayor respecto de aumentar la masa térmica. Ello se observa con la opción de mayor costo (rojo esq. superior derecha) correspondiente al caso extremo de muro de 0.50 m de espesor con máxima aislación (0.20 m).

La Fig. 5 (inferior) muestra el mapa lineal del espesor de la aislación y del espesor del muro interior en el eje x e y respectivamente. La escala de color indica con un rojo intenso los costos que superan los AR\$/a 2000 y con azul oscuro el menor costo anual esperado por climatización. La máxima variación se observa en las combinaciones con escaso espesor de aislación, siendo los muros con mayor espesor y más aislación las opciones más onerosas. Todas las opciones más económicas, se encuentran dentro de la línea de muros de espesor de 0.10 m, siendo el diseño óptimo *CasaOpt* aquél con espesor de 0.07 m de aislación vertical.

Del estudio de las 100 combinaciones de diseño se obtiene el diseño óptimo *CasaOpt*, detallado en la Tabla 2. Previa configuración, se crea de modo automático un archivo en formato Excel con los resultados de las opciones evaluadas, discriminando el mejor diseño. Los espesores están medidos en metros, RDH en % de probabilidad de ocurrencia. Los costos energéticos se dividen en calefacción (H) y refrigeración (AC) de cada zona, y los costos de inversión por aumento de espesor de muros, aislación en muro y en cubierta se presentan como anualidad.

La evaluación realizada prioriza la inversión en aislación, tanto en envolventes horizontales, como verticales, reduciendo la masa térmica interior en los muros respecto de la construcción tradicional. Cabe recordar que la aislación en paredes posee una capa exterior de 0.07 m de ladrillón de canto como protección mecánica, la cual no actúa como masa térmica. La losa cerámica se modifica sólo en el aumento del espesor de la aislación, adicionando 0.06 m de hormigón con perlita, al mínimo de 0.02 m de la CasaConv. Se ilustran detalles constructivos de las envolventes óptimas (Fig. 6). Al utilizar materiales y construcción locales, estos resultados indican la importancia de realizar algunos cambios en los sistemas constructivos verticales utilizados. Inclusive se deberían evaluar otras técnicas constructivas con recursos disponibles en la región y materiales más amigables con el medioambiente.

Se ha calculado con CEEMACON (Ledezma *et al.* 2003) la verificación de la transmitancia térmica y la condensación. Las primeras capas cumplen el nivel A, aunque se presenta una posible condensación sólo en la capa exterior de ladrillón. Si bien la envolvente tradicional condensa en ambos revoques, sería conveniente el estudio de otras posibilidades de protección mecánica de la aislación que procuren similares resultados económicos a los obtenidos en la presente optimización.

Para comparar sobre la misma base, se simula la CasaConv, incorporando el humidificador aplicado en CasaOpt y CasaBio. La CasaConv no alcanza el nivel mínimo admisible de confiabilidad (95%) en la zona 1 (Z1: 91.7%), aunque la zona 2 responde satisfactoriamente a los requerimientos de confort (Z2: 98.7%). Respecto de la CasaOpt y la CasaBio, donde se esperan los mismos riesgos mínimos (RDH de 1.41% en Z1 y 1.11% en Z2), la Z1 de la CasaConv es 83% más riesgosa. La incorporación de un humidificador en la vivienda convencional permitiría disminuir notablemente el desconfort, y probablemente alcanzara el mínimo CCH ajustando la CIC en Z1, sin mejorar las envolventes. La duración total esperada de eventos de desconfort EDD de la CasaConv son 731 h/a en Z1 (antes 2496 h/a) y 119 h/a en Z2 (antes 3195 h/a). Es interesante observar las diferencias constructivas en los muros entre las viviendas comparadas. A simple vista, se podría decir que las mismas no son realmente importantes, si se considera que la CasaBio adiciona aislación y su respectiva protección al muro convencional, siendo el espesor de aislación 0.02 m menor que en la CasaOpt. Sin embargo, existen dos aspectos fundamentales que inciden en los incrementos de los costos globales: 1- la incorporación de aislación en la

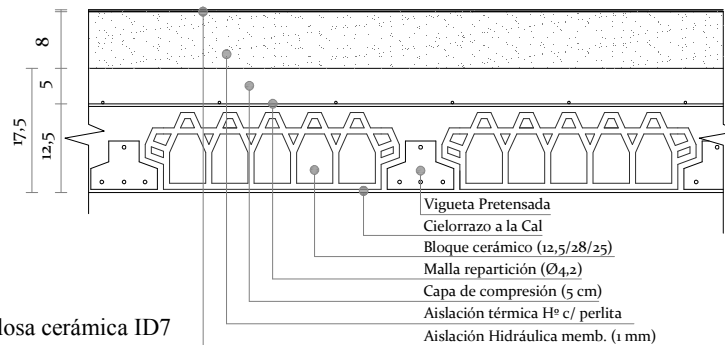
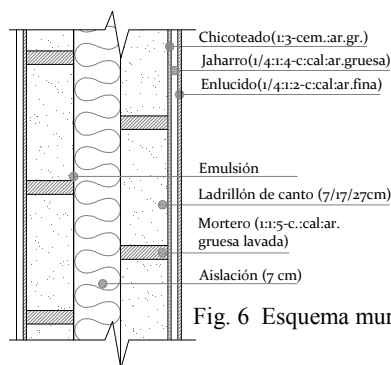


Fig. 6 Esquema muro y losa cerámica ID7

envolvente tiene un alto rendimiento en el ahorro energético y global, 2- una reasignación de recursos (aumento de la aislación térmica acompañada de una disminución de la masa de acumulación), logra un ahorro significativo en los costos de inversión. La Tabla 1 muestra los costos por calefacción necesarios en las opciones bioclimáticas, logrando, en gran parte, el confort por acumulación y conservación de la energía interna y solar.

Se destaca que los consumos energéticos varían en modo significativo entre las viviendas analizadas. Con igual comportamiento consciente por parte de los habitantes, se espera en término de probabilidades que la CasaConv consuma anualmente un 58.5% más de calefacción y un 59.1% más de refrigeración que la vivienda óptima. Los resultados de la CasaOpt respecto de la CasaBio afirman que a través de la optimización basada en simulación del diseño higrótérmico, se disminuyen los costos de inversión con prácticamente el mismo ahorro energético y nivel de confiabilidad. La CasaBio consume un 1.2% menos de energía que la CasaOpt. La diferencia principal radica en la inversión inicial, donde en la CasaOpt se invierten un 9.8% más en aislación vertical, un 15% menos en aislación horizontal y un 44.8% menos en muro interior, logrando un ahorro de inversión superior al 20%.

Comparación porcentual	Conv		Opt vs. Bio
	vs. Bio	vs. Opt	
Ahorro energético	59.56	59.08	-1.18
Sobrecosto inversión	46.33	32.87	20.05
Sobrecosto global	20.38	30.06	-13.84

Tabla 3 Comparación ahorro energético y sobrecosto de inversión y global

Sobrecosto [AR\$/a]	CasaOpt	CasaBio
de Energía	-749.78	-755.84
de Aislacion vertical	349.02	317.88
de aislacion horizontal	63.25	84.31
de Construcción Muros	-184.13	0.00
de Inversión	228.14	402.19
Sobrecosto Total	-521.64	-353.65

Tabla 4 Sobrecosto respecto de CasaConv

Se realiza una comparación porcentual del ahorro energético, el sobrecosto de inversión y el sobrecosto global de los casos analizados en la Tabla 3. Ésta muestra una importante diferencia en el ahorro energético logrado por la CasaOpt (59.1%) y la CasaBio (59.5%) respecto de la CasaConv. En los costos incrementales de inversión, la CasaOpt presenta un sobrecosto del 32.9% y la CasaBio del 46.3% respecto de la CasaConv, recomendando estas inversiones adicionales por que el ahorro global esperado por la CasaOpt supera el 30.1%. Por su parte la CasaBio alcanza un 20.4% de ahorro global, convirtiéndose en una buena opción en el largo plazo, puesto que su sobrecosto global respecto de CasaOpt, es 13.8% menor.

Una vez obtenidos los costos discriminados en la Tabla 2, se determinan los sobrecostos o ahorros netos respecto de la CasaConv como valor inicial de referencia. La Tabla 4 muestra un ahorro energético anual esperado de casi AR\$/a 750 por la CasaOpt, a pesar de tener un sobrecosto de inversión de AR\$/a 228. Se espera un ahorro global de más de AR\$/a 521. En el mismo análisis la CasaBio ahorra AR\$/a 353.6.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Sensibilidad al aumento en los costos energéticos (100%)

Diseño ID	12	CasaConv
Aislación muros	0.12	0.00
Aislación cubierta	0.13	0.02
Espesor muros	0.10	0.20
RDH Zona 1 (%)	1.43	8.30
RDH Zona 2 (%)	1.12	1.30
Costo H Zona 1	80.57	227.56
Costo AC Zona 1	428.66	1321.18
Costo T Zona 1	509.23	1548.74
Costo H Zona 2	39.21	136.82
Costo AC Zona 2	302.86	852.66
Costo T Zona 2	342.07	989.48
Costo E (AR\$/a)	851.31	2538.22
Aislación muros	426.86	0.00
Aislación cubierta	170.78	54.89
Espesor muros	226.98	411.11
Inversión (AR\$/a)	824.62	466.00
Costo Global	1675.93	3004.22

Tabla 5 Sensibilidad al Costo Energético (100%)

Considerando que en Argentina, los costos energéticos de tipo residencial se encontraban altamente subsidiados y no se incorporan aún costos ambientales, se presenta el escenario de aumento de 0.185 a 0.37 AR\$/m³ de gas y de 0.30 a 0.60 AR\$/ kWh de electricidad. En la Tabla 5 la opción óptima en este escenario es la N° 12, la cual incorpora mayor espesor en aislación (0.12 m vertical y 0.13 m en cubierta) y mantiene el espesor de 0.10 m de muro respecto de la CasaOpt en el escenario base (EscB). Se incorporan en el análisis el resultado de la CasaConv, esta vez frente a un aumento del costo energético. Resulta así óptimo aumentar los costos energéticos un 58.6% en calefacción (H) 64.8% refrigeración (AC) en ambas zonas y en total un 63.9% en comparación con el EscB. Otra consecuencia es el aumento de la inversión, 22.3% en aislación de muros, un 44.9% en aislación en cubierta, manteniendo la inversión en muros. Esto último afirma una vez más que la opción óptima no justifica la sobreinversión en muro interior de 0.20 m, sino destinar estos recursos a la incorporación de aislación vertical y horizontal. Las mayores inversiones motivadas por el incremento del costo energético, afecta las decisiones de diseño arquitectónico, tanto de las construcciones nuevas, como de las posibles mejoras en edificios existentes, especialmente en viviendas unifamiliares donde habitan el 65% de los sanjuaninos y el 61% de los argentinos (Czajkowski, 2009). Los costos totales crecen un 38.1% respecto de CasaOpt según EscB, aumento más que significativo para la economía regional. La Tabla 5 muestra claramente que la CasaConv no es una opción recomendable, superando en más de un 55% (AR\$ 3004) el costo global de la combinación de diseño N° 12.

La metodología posibilita realizar un análisis de sensibilidad aún más detallado, por ejemplo el aumento del 100% sólo del gas natural, ya que es la fuente de energía que presentaba mayor distorsión en su precio respecto del contexto sudamericano y mundial (STAWAG, 2011). Aquí, el diseño óptimo es el N° 8, es decir 0.01 m adicional en aislación que el diseño óptimo en el EscB. El costo global anual resultante sería de ARS/a 1262.4 es decir, un 3.9% más que en CasaOpt. En síntesis, en el escenario de un aumento de energía del 100% es conveniente invertir en aislación y disminuir la masa térmica interior.

Diseño ID	9
Aislación muros	0.09
Aislación cubierta	0.10
Espesor muros	0.10
RDH Zona 1 (%)	1.90
RDH Zona 2 (%)	1.57
Costo H Zona 1	56.72
Costo AC Zona 1	366.07
Costo T Zona 1	422.79
Costo H Zona 2	27.62
Costo AC Zona 2	238.00
Costo T Zona 2	265.63
Costo E (ARS/a)	688.41
Aislación muros	380.15
Aislación cubierta	139.20
Espesor muros	226.98
Inversión (ARS/a)	746.33
Costo Global	1434.75

Sensibilidad al aumento en la restricción de confort

La sensibilidad en cuanto a las condiciones higrotérmicas que debe cumplir el edificio consiste en modificar los límites de confort con los cuales se evalúan los diseños explorados.

Se analiza una disminución permitida de $\pm 1^\circ\text{C}$ en la Z1, estableciendo como límites inferior y superior respectivamente 20 y 25°C en temperatura, y 30% y 70% en HR. Se conservan las características constructivas de la CasaOpt, modificando sólo la termostatación de los equipos en 20.5°C y 24.5°C para evitar pérdida de confiabilidad por ese aspecto. Se grafica en la Fig. 6 el RDH obtenido con la nueva restricción de confort para Z1 de los 100 diseños evaluados. Esta presenta mayor confiabilidad a medida que se aumenta el espesor de la aislación y el espesor de los muros, alcanzando un mínimo de 1.9% de probabilidad de RDH a partir de los 0.07 m de aislación vertical, 0.08 horizontal con muro de 0.10 m (ID 7) y un máximo riesgo de 4.5% registrado en el mínimo espesor de aislación y muro (ID 1).

El comportamiento de la confiabilidad en el rango de diseño evaluado es similar al obtenido en el EscB, sin embargo el riesgo mínimo es un 35.7% mayor y el máximo un 61.4%, a pesar de la reconfiguración de las temperaturas de los equipos. En cuanto a la Z2, la misma presenta el mismo comportamiento, aumentando un 41.1% el riesgo mínimo. No obstante, todas las configuraciones de diseño cumplen con la exigencia de confiabilidad. El diseño óptimo en este análisis (Tabla 6), corresponde a un muro de 0.10 m de espesor y aislaciones de 0.09 y 0.10 m en pared y cubierta respectivamente con una confiabilidad de 98.1% en Z1 y 98.4% en Z2. Los costos de inversión registran un incremento de sólo un 7.5%, mientras que en los costos energéticos un 32.5% respecto del EscB. El sobrecosto global es un 18.2% mayor que la CasaOpt, y un 17.3% menor que la CasaConv en el EscB.

Tabla 6 Sens. al Confort

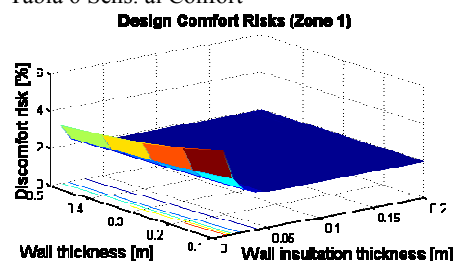


Fig. 6 RDH de la Sensibilidad al Confort Z1

Análisis a la Tasa de Descuento

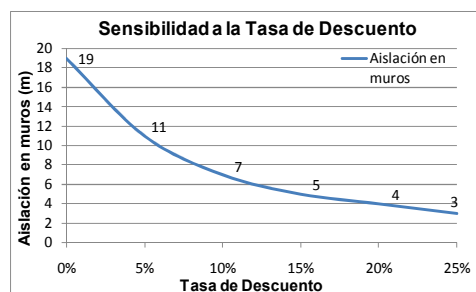


Fig. 7 Espesor de la aislación dependiente de Tasa de Descuento

En los costos globales se destaca un incremento significativo en función del aumento de la tasa de descuento, especialmente causado por los costos de inversión generados. El escenario 5% genera un 28% menos de costos globales que el EscB, mientras que el 15% y 20%, un incremento de 27% y 52.8% respectivamente. Los costos de inversión se reducirían un 37.5% si la tasa de descuento fuera 5%. El diseño óptimo se modifica sustancialmente cuando la tasa de descuento tiende a cero, justificando una aislación vertical de 0.19 m, la cual reduce los costos globales un 48.7% respecto del EscB. Si la tasa fuera 15%, los costos de construcción se incrementarían un 37.7%, y un 75.9% para el escenario del 20%. Los costos energéticos por climatización convencional se modifican porque los diseños óptimos cambian. Los mismos disminuyen un 70.2% con la aislación 0.12 m mayor que el EscB (ID 19) y un 15.4% para una tasa de 5%. Los aumentos en los escenarios de 15, 20 y 25% son de 12.9%, 21.8% y 33.4% respectivamente. La Fig. 7 muestra un rápido crecimiento del espesor de la aislación en función de la disminución de la tasa de descuento, mientras que el aumento de la misma modifica el óptimo en menor grado.

CONCLUSIONES

La optimización por confiabilidad basada en simulación, posibilita la correcta asignación de recursos de inversión y de energía, evitando el sobre o sub dimensionamiento de la climatización en cuanto al mejoramiento de envolventes y consumo energético. A su vez es posible determinar de manera cuantitativa en término de probabilidades la conveniencia de aplicar estrategias bioclimáticas en el diseño de envolventes, la incorporación de humidificación y ventilación selectiva, tanto para mejorar la calidad higrotérmica de los ambientes interiores, como para lograr ahorros económicos globales durante la vida útil del edificio con la consiguiente disminución del consumo energético. La reducción de este último no es una consecuencia

menor, teniendo en cuenta el aumento continuo de precios energéticos y la larga vida útil de las viviendas, estimada en 50 años (edad previa al reciclaje), siendo importante que los profesionales de la construcción e instituciones estatales, incorporen ciertas recomendaciones de diseño arquitectónico en las obras públicas y privadas, dado que la inacción actual, condicionaría la correcta asignación de los recursos del próximo medio siglo. La evaluación de los costos iniciales en el diseño de envolventes, sus consumos energéticos durante la vida útil de los edificios y el nivel de confiabilidad higrotérmica que ofrecen los mismos, es primordial en los grandes centros urbanos, donde la incidencia del ahorro energético y de inversión sería de gran impacto a nivel nacional.

La metodología desarrollada posibilita incorporar otros módulos independientes para ampliar y profundizar el análisis higrotérmico-económico de edificios con el propósito de la utilización de optimización numérica en Arquitectura.

No sólo es valioso determinar el diseño óptimo dentro de un amplio espacio de opciones, sino la posibilidad de comparar con otras respuestas arquitectónicas, en este caso de aplicación principalmente constructivas, pudiendo realizar análisis similares de otros aspectos del diseño edilicio. Si bien la metodología bivariada posee la limitación de evaluar sólo dos variables simultáneamente, la formulación más precisa posibilita abarcar otros aspectos del diseño estrechamente relacionados.

Los resultados obtenidos, tanto de diseño como, de ahorro energético y de inversión pueden orientar la toma de decisiones en el mejoramiento de envolventes sin sobredimensionar la inversión, y de esta manera realizar aplicaciones masivas de ahorro y mantener la sustentabilidad de las construcciones. Los resultados más significativos se refieren a la reasignación de recursos en aislación vertical disminuyendo la inversión en masa térmica en muros en todos los escenarios analizados; solucionar el discomfort por deshumidificación con estrategias de bajo costo y lograr una disminución de más de 59% en el consumo energético. El concepto de riesgo de discomfort y su cuantificación es de gran valor por su capacidad para realizar una evaluación comparativa de las diferentes combinaciones de diseño de las edificaciones. Se considera que el mismo es de aplicabilidad en el ejercicio profesional, la investigación científica, pudiendo considerarse en normativas y certificaciones edilicias nacionales e internacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Edwards, B. 2001. Rouge Guide to Sustainability. Traducción Sandra Sanmiguel Sousa. Gustavo Gili. pp. 1-2.
- Evans J. (2010). CPAU Sustentabilidad en Arquitectura. pág. 27-30.
- LEED (2001). Rating System, version 2.0. US Green Building Council.
- Al-Homoud (1997). Optimum thermal design of office buildings. *International Journal of Energy Res*; Vol. 21. Pp. 941-957.
- Wang W., Rivard H., Zmeureanu R. (2006). Floor shape optimization for green building design. *Advanced Engineering Informatics*; 20:363-78.
- Ellis P., Griffith B., Long N., Torcellini P., Crawley D. (2006). Automated multivariate optimization tool for energy analysis. Conference paper NREL/CP-550-40353. IBPSA SimBuild Conference Cambridge, Massachusetts
- Caldas y Norford 2002, A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automat Constr*;11:173-84.
- Mechri HE Capozzoli A., Corrado V.(2010). USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design. *Applied Energy*, Elsevier, pp. 11 Vol. 87, 3073 a 3083, ISSN: 0306-2619 DOI:10.1016/j.apenergy.2010.04.001.
- Wetter M. (2004). GenOpt-A generic optimization program, Version 2.0.0. User Manual. Berkley, CA: Simulation research group, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Kumar R., Sinha A, Singh B. Modhukalya U. (2008). A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm. *Renewable Energy* 33. 2282-2288.
- Lagaros N., Garavelas A., Papadrakakis M. (2008). Innovative seismic design optimization with reliability constraints. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 198:28-41
- Pietrzyk K. (2000). Probabilistic modelling of air infiltration and heat loss in low-rise buildings. PhD thesis, School of Architecture, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Sulaiman H. (2011). Confiabilidad y economía en la optimización del diseño bioclimático. Tesis Doctoral del Programa de Doctorado de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Universidad de Mendoza.
- Sulaiman H., Blasco I., Olsina F. (2010). Procedimiento microeconómico de evaluación térmico-energética unitaria de envolventes edilicias: PROMETE-U. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 25:1-10.
- Chiang (1967). Métodos fundamentales de Economía Matemática. Ed, McGraw Hill. U.S.A.
- Ledesma S., Gonzalo G., Martinez C., Tortonese A. (2003). Evaluación del comportamiento higrotérmico, de asoleamiento y lumínico de edificios de oficinas en San Miguel de Tucumán. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7(1).
- Czajkowski, J. 2009. Análisis y Modelación Energético-Ambiental de la Edilicia Urbana basado en Técnicas de Auditoría y Procedimientos Estadísticos Multivariados. Desarrollo de herramientas de diagnóstico y simulación. Tesis doctoral ULP.
- STAWAG, 2011. Energía Aquisgrán S.A. Alemania. Precio del gas, enero 2011

ABSTRACT: This work presents a new methodology for hygrothermal design optimization by reliability. It performs the bivariate optimization of the thickness insulation in the envelopes, and the mass accumulation in exterior walls of a housing project located in San Juan city along his lifetime, incorporating reliability constraints of building's thermal performance expressed in terms of maximum allowable values for the occurrence probability of discomfort events. Its implementation is carried out by simulating the hygrothermal behavior of 100 combinations designs under the uncertainty introduced by the random fluctuations of the external environment. This allows quantifying the hygrothermal conditions and expected energy consumption of each room of the building. The costs of materials, labor and energy are from January 2011. It is calculated the annualized investment cost overruns, which are added to the heating and cooling expected annual cost. Further are performed sensitivity analyzes to increasing of HVAC energy costs, comfort level, and discount rate. Detailed scopes and limitations of the research are described.

Key words: hygrothermal simulation, economic optimization, discomfort risk, Monte Carlo.