

PROCEDIMIENTO MICROECONÓMICO DE EVALUACIÓN TÉRMICO-ENERGÉTICA UNITARIA DE ENVOLVENTES EDILICIAS: *PROMETE-U*

Halimi Sulaiman¹, Irene Blasco Lucas², Fernando Olsina³

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:10-03-10; Aceptado:12-04-10.

RESUMEN.- La selección de la envolvente es un factor determinante en el desempeño térmico-energético de un edificio, siendo habitual utilizar el precio por unidad de superficie para realizar su valoración económica. Por este motivo, el objeto de la investigación consistió en desarrollar un procedimiento micro-económico de evaluación térmico-energética unitaria (*PROMETE-U*) de tecnologías de envolventes, aplicando el método del ciclo de vida con los costos en la vida útil durante la fase de uso de las mismas. Se utilizó como índice el valor anualizado, que incluye los costos iniciales (materiales, mano de obra y capacidad instalada de climatización), y los costos futuros asociados (energía para climatización y costos de mantenimiento). Se consideró la incidencia de los refuerzos sismorresistentes en los costos y en las características térmicas, para zonas sísmicas. Su estructura en soporte informático facilita la ejecución de estudios actualizados y de análisis de sensibilidad en distintos escenarios.

Palabras Claves: Procedimiento microeconómico, superficie unitaria, evaluación térmico-energética, envolventes edilicias

MICROECONOMIC PROCEDURE FOR UNITARY THERMAL-ENERGY EVALUATION OF BUILDING ENVELOPES: *PROMETE-U*

ABSTRACT.- Selecting the envelope is a determining factor in thermal-energy performance of buildings, being common to use the price per unit area for its economic assessment. Therefore, the purpose of the research was to develop a micro-economic procedure for unitary thermal-energy evaluation (*PROMETE-U*) of envelope's technology, applying the method of life cycle costs over the lifetime during the use phase of them. The annualized value was used as index, which includes the initial costs (materials, labor and HVAC installed capacity), and future costs associated (air conditioning energy and maintenance costs). It was considered the influence of earthquake-resistant reinforcements in the costs and thermal characteristics for seismic zones. Its informatics' structure facilitates the implementation of sensitivity analysis on different scenarios.

Keywords: Microeconomic procedure, unitary surface, thermal-energy evaluation, building envelopes

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad resulta primordial lograr edificios que sean confortables higrotérmicamente no sólo minimizando costos sino también el impacto ambiental, el cual se relaciona principalmente con el consumo energético asociado a equipos de climatización (Al-Homoud, 2005; Fernández *et al.* 2001). Está demostrado que tanto el aumento de la eficiencia de los artefactos utilizados para calefacción y refrigeración, como el adecuado diseño arquitectónico representan importantes contribuciones para alcanzar este objetivo (Velásquez, 1997). Dentro de esta última estrategia, el tratamiento apropiado de la envolvente edilicia desde el

punto de vista constructivo, juega un rol protagónico para propiciar ahorro energético de fuentes convencionales durante la fase de ocupación de los edificios, evitando que los mismos se transformen en hipotecas energéticas para sus usuarios y la sociedad en su conjunto (Filippín y Flores Larsen, 2005; Selamet, 1995).

Este indiscutible argumento es relativizado al momento de materializar una obra, pues siempre existen restricciones presupuestarias para la inversión inicial, aunque se tenga una gran conciencia ambiental, y en algunos casos de optimización térmica los costos pueden resultar inaccesibles (Filippín *et. al.* 2005).

Los costos de materiales de construcción y mano de obra, y el desempeño térmico de una envolvente edilicia en distintas zonas del país presentan importantes diferencias, dependiendo tanto de las características climáticas y telúricas, como de la infraestructura y la situación socio-económica que cada una posee, por lo cual es necesario

1. Becaria Doctoral CONICET (Tipo II). Trabajo desarrollado en el marco de los proyectos PIC 21/A813 (CICITCA-UNSJ) y PICT 06-00956 (FONCYT-ANPCYT).
2. Investigadora UNSJ Categoría I, Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat-FAUD. Directora de la Becaria.
3. Investigador Asistente CONICET, Instituto de Energía Eléctrica-FI-UNSJ.

realizar estudios específicos. A ellos se suma el costo asociado a la demanda de energía para el control climático del edificio, el cual sólo puede ser analizado si el nivel de confort interior está claramente definido (Simmonds, 1993).

Por otro lado, la condición de seguridad en construcciones que se ejecuten en regiones de elevada peligrosidad sísmica implica un sobre-costo relevante, que difiere según la tecnología adoptada. La relación existente entre la calidad térmica y los costos asociados a tecnologías constructivas aplicadas en envolventes edilicias de diferentes zonas geográficas resulta evidente. No obstante, los criterios para llevar a cabo las evaluaciones, cuando se desea realizar comparaciones con el fin de tomar decisiones, no son uniformes y homogéneos.

Existen varios métodos estacionarios (Normas IRAM 11604 y 11605) y dinámicos (programas de simulación térmica como SIMEDIF, ECOTECT, etc.) para analizar la eficiencia energética y el confort higrotérmico de edificios, con distintos niveles de precisión, los cuales resultan apropiados para diferentes momentos del proceso de diseño. La mayoría se basa en el estudio del edificio completo, pudiendo llegar a obtener ciertos índices (Transmitancia térmica, Carga energética, Coeficiente Global de Pérdidas, Factor de Forma, etc.) que permiten realizar comparaciones sobre alternativas de diseño y constructivas.

Sin embargo, y teniendo en cuenta que la unidad de superficie es la medida más utilizada en la construcción - tanto para el cálculo de cómputos y presupuestos de materiales y mano de obra, como para cuantificar pérdidas o ganancias de energía- resultaría de interés tener un catálogo previo con la relación precio-rendimiento local de variantes constructivas de distintos elementos de la envolvente - realizado sobre una base homogénea- que facilitara la discriminación de la incidencia de costos iniciales y futuros de cada tecnología, y otorgara una justa valoración a aquellas térmicamente más eficientes que las tradicionales, como es el caso de tecnologías bioclimáticas (Filippín *et al.* 2001). Un estudio sobre el tema realiza Martínez (2005), utilizando un valor medio ponderado de transmitancia térmica para evaluar un tipo de tecnología de envolvente de uso frecuente en Tucumán, y analizando la variación de costos.

Otros aportes para la sistematización de la evaluación por unidad de superficie de una serie de alternativas de muros y techos fueron realizadas por Blasco Lucas (1997) en San Juan aplicando el método microeconómico del ciclo de vida (Duffy & Beckmann, 1991), y por Marek y Filippín (2003) en La Pampa, que analizan sólo la inversión inicial, motivando este último el desarrollo de un procedimiento de evaluación térmico-económico unitario (Blasco, Sulaiman, 2006) en el cual se relacionaron parámetros térmicos con los costos iniciales de materiales y mano de obra para cada tipo de muro analizado. Arboit *et al.* (2008) incorpora el índice Factor de Eficiencia Económica de los componentes constructivos y evalúa energética y económicamente dos tipologías de vivienda social en Mendoza.

Aplicando métodos propios de la microeconomía, el presente trabajo amplía sustancialmente el procedimiento realizado por las autoras en 2006, estableciendo criterios que permiten incorporar los costos futuros asociados al desempeño térmico de cada tecnología de envolvente analizada.

2. PROCEDIMIENTO PROPUESTO

Con el fin de contar con una herramienta de cálculo para determinar los costos unitarios [\$/ m²] en el ciclo de vida relacionados con su comportamiento térmico-energético en la fase de uso de diferentes tecnologías de envolvente, que permita inclusive analizar la incidencia de las distintas variables intervinientes y poder determinar cual de ellas es la óptima económica, se elabora un procedimiento de tipo estacionario que aplica métodos microeconómicos.

Para ello, se selecciona el índice del Valor Anualizado, que contempla la inversión inicial y los costos futuros, reduciéndolos a cuotas anuales uniformes durante la vida útil de cada tecnología, mediante la aplicación del método del Valor Presente (Sapag Chain, 2008). La reducción a la unidad de superficie de los sistemas constructivos se realiza considerando la máxima dimensión permitida para cada elemento en la zona de implantación. Para esto, se aplican las Normas CIRSOC (2007) incluyendo la parte proporcional de estructura sismorresistente en el caso de regiones sísmicas y un índice de ponderación según el grado de seguridad que los mismos ofrecen (Blasco, Sulaiman, 2006). La estimación del comportamiento térmico de cada sistema se efectúa en base a la transmitancia térmica, la cual es utilizada para el cálculo de consumo energético anual, a partir de fijar condiciones mínimas de confort (ASHRAE, 2001) y días típicos de temperatura exterior para cada mes del lugar que corresponda, considerando la demanda energética de las 8760 horas del año discriminada para calefacción y para aire acondicionado, como carga energética horaria. Los costos de cada alternativa constructiva se obtienen en base a precios de mercado discriminados en materiales y mano de obra, cuya suma constituye la Inversión Inicial de cada sistema. A ella se adiciona los costos proporcionales de equipos de climatización. Los costos anuales de mantenimiento están calculados respectivamente como un determinado porcentaje de los costos de materiales y mano de obra. El cálculo del Valor Anualizado se realiza considerando la vida útil de cada alternativa y de los equipos de climatización asociados, en base a una tasa de descuento estándar durante el ciclo de vida fijado. El costo unitario anualizado (CUA) en d de cada tecnología de envolvente se obtiene de la suma de los costos anualizados de inversión inicial (CCA), de capacidad instalada en equipos de calefacción y aire acondicionado (CCI), de mantenimiento (CM) y los costos anuales de energía para climatización u operación (CE); tal como se expresa en la ecuación (1).

$$CUA_i = CCA_i + CCI_i + CM_i + CE_i \quad (1)$$

La estructura del procedimiento elaborado se esquematiza en la Figura 1, donde a partir de bases relacionales de datos económicos, de materiales, térmico-energéticos y climáticos se diferencian tres niveles de cálculo: a) básicos unitarios, b) económicos, y c) microeconómicos, con sus principales variables y secuencias.

3. ASPECTOS TÉRMICO-ENERGÉTICOS

Se especifican a continuación los criterios aplicados para la determinación del consumo de energía generado por cada tecnología de envolvente, y por consiguiente los costos de climatización asociados:

- Se modelan sólo pérdidas o ganancias de calor por conducción a través del muro en estado estacionario.
- La transmitancia térmica de las envolventes se calcula según normas IRAM 11601 (2002). La incidencia de la estructura sobre la transmitancia térmica es considerada según Martínez, 2005.
- Las conductividades de los materiales utilizadas corresponden a la Norma IRAM 11604 (2002), e información complementaria de otras fuentes bibliográficas (Carke *et al.*, 1990).
- Las condiciones exteriores se representan como las temperaturas horarias promedio de cada mes del año en la localidad bajo estudio.
- Las temperaturas de confort interiores se establecen según ASHRAE (2001).
- Se contabiliza por separado la energía requerida para calefacción (H) y refrigeración (AC).

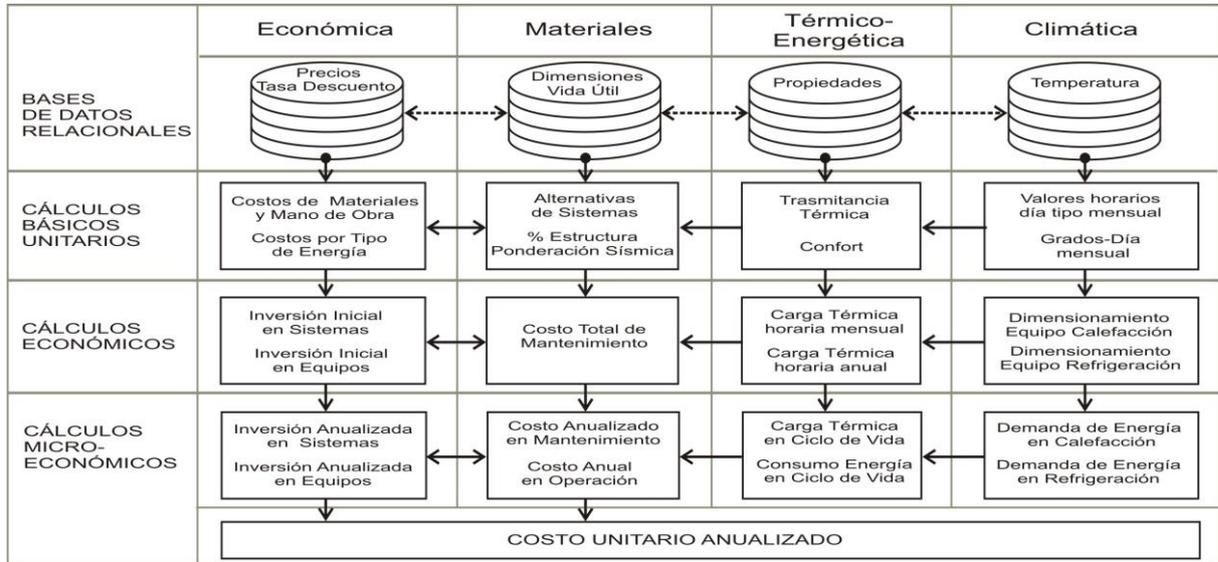


Fig. 1. Estructura del procedimiento elaborado.

3.1. El confort interior según ASHRAE

Con el fin de establecer rangos de temperatura de confort higrotérmico interior reconocidos a nivel internacional, se utilizó la carta de confort ASHRAE (2001) que los determina en función de valores de humedad relativa y el porcentaje probable de personas que experimentan bienestar en verano e invierno. En base a los mismos se establecieron rangos adicionales producto del promedio de las estaciones extremas, para los casos de climas cuyas estaciones intermedias adquieren gran relevancia. A modo de ejemplo se incluye la Tabla 1, donde se indican en sombreado los valores considerados como escenario base.

Tabla 1. Temperaturas límites de las bandas de confort

	HR (%)	Inv. (°C)	Ver. (°C)	Prim/Ot. (°C)			
98%	30	21,8	26,0	23,9			
	40	21,1	25,3	23,2			
	50	20,4	24,1	22,3			
	60	20,0	23,7	21,8			
84%	30	20,3	24,4	23,3	26,7	21,8	25,6
	40	20,3	24,2	23,1	26,4	21,7	25,3
	50	20,3	23,6	22,8	26,1	21,5	24,9
	60	20,0	23,3	22,8	25,6	21,4	24,4
75%	30	20,4	24,6	23,6	28,7	22,0	26,6
	40	19,7	23,4	23,3	27,4	21,5	25,4
	50	19,7	23,2	22,0	26,7	20,9	25,0
	60	19,3	22,5	21,7	26,0	20,5	24,3
50%	30	19,8	26,0	21,8	29,2	20,8	27,6
	40	19,4	25,3	21,8	28,1	20,6	26,7
	50	19,1	24,6	21,1	27,4	20,1	26,0
	60	18,4	23,9	20,6	26,7	19,5	25,3

3.2. Demanda de Energía

La demanda anual de energía para calefacción Q_H^i o refrigeración Q_{AC}^i [J/m²/a], requerida por cada tecnología de envolvente i se calcula como:

$$Q_{H,AC}^i = 3600 \sum_{m=1}^{12} D_m \sum_{h=1}^{24} K_i \times DT_{h,m}$$

(2)

donde K_i es la transmitancia térmica de cada envolvente calculada conforme Norma IRAM 11601 (2002) y $DT_{h,m}$ la diferencia para la hora del día h de la temperatura exterior promedio \bar{T}_h^E y la temperatura de confort interior $T_{h,m}^I$ según ASHRAE (2001) para cada mes del año m , y D_m es la cantidad de días que tiene cada mes.

La diferencia de temperatura exterior e interior $DT_{h,m}$ se obtiene mediante la siguiente ecuación, cuyo signo negativo indica necesidad de calefacción y el positivo, de refrigeración:

$$DT_{h,m} = \bar{T}_{h,m}^E - T_{h,m}^I \quad (3)$$

3.3. Relación entre Confort y Demanda de Energía.

La Figura 2 ilustra para un día típico de enero, la banda de confort interior con un 75% de las personas en bienestar de acuerdo al perfil horario de humedad relativa. Se grafican también las temperaturas horarias promedio exteriores \bar{T}_h^E , y el consumo horario resultante de energía para refrigeración para una tecnología de envolvente determinada.

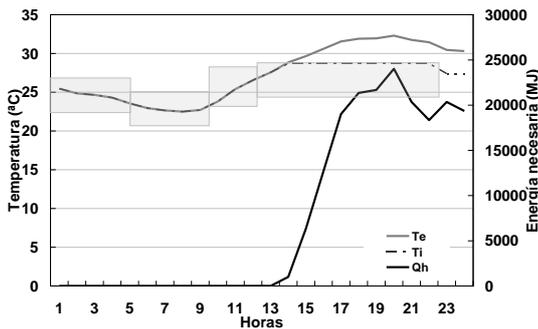


Fig. 2. Consumo de energía (AC) por envolvente en Enero.

Cuando la temperatura exterior excede el límite superior de la banda $T_{h,m}^{I+}(r)$ se considera que existe demanda energética de refrigeración. En forma inversa, si la temperatura cae por debajo de la temperatura límite inferior de confort $T_{h,m}^{I-}(r)$, será necesario suministrar energía de calefacción. Sobrepasados dichos límites, la temperatura interior adoptada es la máxima (o mínima) del rango de confort establecido. Los consumos anuales de gas para calefacción y de electricidad para refrigeración se obtienen dividiendo la demanda energética correspondiente por el rendimiento de los equipos seleccionados para abastecerla.

3.4. Cálculo de la Capacidad Instalada

La magnitud de la capacidad de los equipos de climatización se estima en función de la carga horaria pico anual de calefacción P_H^i y de refrigeración P_{AC}^i en $[W/m^2]$. Para compensar completamente la máxima pérdida o ganancia de calor $Q_{h,m}^i$ por conducción en la h -ésima hora del año que presenta condiciones más desfavorables, evitando de este

modo que las temperaturas interiores caigan fuera del rango de confort establecido:

$$P_H^i = \left| \min[Q_{h,m}^i] \right| = \left| \min[K_i \times DT_{h,m}] \right| \quad "h,m$$

$$P_{AC}^i = \max[Q_{h,m}^i] = \max[K_i \times DT_{h,m}] \quad "h,m \quad (4)$$

4. ANÁLISIS MICRO-ECONÓMICO UNITARIO

El cálculo de costos comprende 4 tipos fundamentales: de Construcción (CC), de Mantenimiento (CM), de Capacidad Instalada (CCI) y de Energía (CE). Sus interrelaciones y principales variables se muestran en la Figura 3.

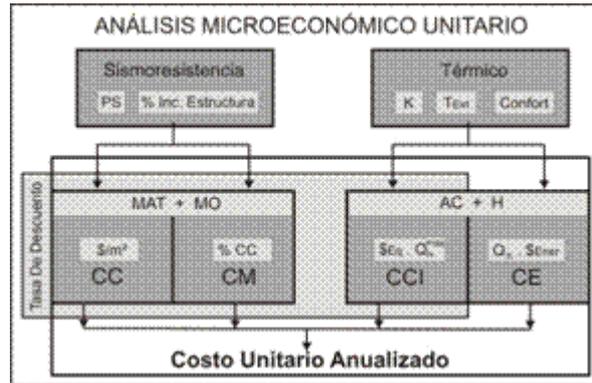


Fig. 3. Esquema conceptual de cálculo del CUA.

A continuación se presentan los criterios específicos, hipótesis adoptadas y ecuaciones utilizadas para el cálculo individual de cada tipo de costo.

La reducción a la unidad de superficie se realiza a partir de la superficie máxima S_{max}^i de la tecnología de envolvente a analizar, determinada por las dimensiones máximas permitidas en códigos de edificación locales, en función de márgenes de seguridad exigidos por riesgo de sismo, de vientos, u otros fenómenos característicos. Los datos correspondientes a la misma es la información básica de ingreso para los cálculos iniciales.

4.1. Cálculo de los costos de construcción

En el Costo de Construcción (CC) de cada alternativa tecnológica de envolvente i se consideran los costos de materiales (MAT) y mano de obra (MO) necesarios para llevarla a cabo, incluyendo los costos de transporte para aquellos casos en que se deba discriminar, como también los proporcionales de la estructura y otras particularidades (ej. refuerzos, aislación, revestimientos, etc.). La ecuación de cálculo de MAT se reduce al producto precio unitario por cantidad.

Los Costos de Mano de Obra se computan como el producto del costo horario de Oficial y/o Ayudante que exige cada actividad para construir una superficie S_{max}^i de acuerdo a los valores oficiales publicados por la Unión de Obreros de la Construcción Argentina (UOCRA) para cada zona del país,

por la cantidad de horas necesarias que insume cada tarea, estimadas en Chandías y Ramos (2004).

El costo total de materiales y mano de obra para construir el paño de muro de tecnología i , se divide por S_{\max}^i obteniendo el costo unitario de construcción expresado en [\$/m²]. Este desembolso inicial puede ser representado de manera equivalente como una anualidad CCA_i , es decir una sucesión de pagos anuales iguales durante la vida útil de la envolvente con idéntico valor presente. De esta manera es posible comparar apropiadamente tecnologías con vidas útiles muy distintas. La anualización del costo inicial de construcción C_c^i se efectúa aplicando la ecuación general de microeconomía según Sapag Chain (2008):

$$CCA_i = \rho \cdot C_c^i \cdot \left[1 - (1 + \rho)^{-T_a^i} \right]^{-1}$$

(5)

donde CCA_i es el costo anualizado de construcción por unidad de superficie, expresado en [\$/m²/a], r es la tasa de descuento anual en años [a⁻¹] y T_a^i es el tiempo de amortización de la inversión en años [a], asumido igual a la vida útil de cada tecnología.

4.2. Cálculo de los Costos de Mantenimiento

Los Costos de Mantenimiento (CM) de cada tecnología i , están asociados con las reparaciones y reposiciones de sus elementos componentes durante el ciclo de vida considerado. En el primer caso se definen como un porcentaje de los costos de construcción C_c^i que se reinvierten y en el segundo en función de los periodos de mantenimiento. La Tabla 2 presenta un ejemplo de datos de ingreso para 13 alternativas constructivas de muros, elaborado a modo de Programa de Mantenimiento, es decir, en las 7 primeras tecnologías se reinvierte el 10% del C_c^i de todas las capas cada 10 años. Se incluye la caracterización sismorresistente de las mismas, donde MS=Muy Seguro, S=Seguro, V=Vulnerable, I=Inseguro, MI=Muy Inseguro.

Tabla 2. Caracterización sismorresistente, vida útil, periodos y porcentaje de reinversión de CC por Mantenimiento.

Envoltentes (muros)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Sismoresistencia	MS		S		MS	V	MI		I		MI		
Vida útil (años)					50				40	30	35	15	20
Mantenimiento % CC					10			5	10	16	12	20	18
periodos (años)					10								5

El Costo Anualizado de mantenimiento CM_i se obtiene de forma análoga, donde C_r^i es el valor presente de los desembolsos acumulados en el programa de mantenimiento durante la vida útil del muro:

$$CCM_i = \rho \cdot C_r^i \cdot \left[1 - (1 + \rho)^{-T_a^i} \right]^{-1}$$

(6)

4.3. Cálculo de los Costos de Capacidad Instalada

El costo de la capacidad de calefacción por unidad de potencia efectiva CP_U^H en [\$/W], se obtiene como el cociente

entre los costos de adquisición e instalación del equipo de calefacción CP^H en [\$/W] y la capacidad nominal del equipo P_N^H en [W] afectado por su rendimiento térmico h_H . El mismo procedimiento se realiza para AC.

$$CP_U^H = CP^H \cdot (P^H h_H)^{-1}$$

$$CP_U^{AC} = CP^{AC} \cdot (P^{AC} h_{AC})^{-1}$$

(7)

El costo inicial de la capacidad instalada de climatización por unidad de superficie C_{CI}^i en [\$/m²] asociado a cada tecnología i , se calcula como la suma del producto de los costos por unidad de potencia, CP_U^H y CP_U^{AC} respectivamente, por las pérdidas (ganancias) pico por conducción que registra la envolvente i por unidad de superficie en la condición más desfavorable:

$$C_{CI}^i = (CP_U^H \cdot P_H^i) + (CP_U^{AC} \cdot P_{AC}^i)$$

(8)

La anualización CCI_i de los costos de climatización C_{CI}^i en [\$/m²/a] se calcula como:

$$CCI_i = \rho \cdot C_{CI}^i \cdot \left[1 - (1 + \rho)^{-T_a^i} \right]^{-1}$$

(9)

donde T_a^c es el tiempo de amortización de los equipos.

4.3. Cálculo de los Costos de Energía

Por ser considerados como cuotas constantes en el tiempo se toman los costos anuales de energía de climatización CE_i , que surgen de sumar CE_H^i y CE_{AC}^i . Estos costos son los productos del precio unitario de la energía, electricidad p_E para AC y gas natural p_{GN} para H según la región y el segmento tarifario que corresponda, por el cociente entre la cantidad de energía anual requerida Q_{AC}^i y Q_H^i afectada de los rendimientos respectivos de los equipos seleccionados:

$$CE_H^i = p_{GN} \cdot \left[Q_H^i \cdot (\eta_H)^{-1} \right]$$

$$CE_{AC}^i = p_E \cdot \left[Q_{AC}^i \cdot (\eta_{AC})^{-1} \right]$$

$$CE_i = CE_H^i + CE_{AC}^i$$

(10)

Finalmente, el Costo Unitario Anualizado CUA_i de cada tecnología, resulta de sumar los distintos costos anualizados detallados, aplicando para ello la ecuación (1).

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El procedimiento prevé la posibilidad de realizar diferentes análisis de sensibilidad en función de tres variables:

- costos de energía,
- niveles de satisfacción en confort interior,
- tasa de descuento anual.

Cada una de ellas puede estudiarse en forma individual, relacionándolas con el CUA, o mediante la conformación de variaciones simultáneas de las tres variables, comparados con un Escenario Base (EB) previamente determinado. Por ejemplo, el EB se puede definir con precios actuales de energía, materiales y mano de obra locales, 75% de personas que se sienten confortables y una tasa de descuento de 10% anual.

La Figura 4 ilustra los gráficos obtenidos de los análisis de sensibilidad propuestos para un caso de aplicación, con incrementos del 50%, 100% y 150% del actual precio de la energía y manteniendo el EB antes descrito, diferentes niveles de bienestar y tasas de descuento del 5%, 10% y 15%. De este modo, se puede obtener un orden de prelación de las alternativas tecnológicas analizadas para elementos de envolventes edilicias, bajo diferentes condiciones predeterminadas, facilitando la toma de decisión según el grado de probabilidad de ocurrencia de las mismas.

Se programó un libro en Microsoft Excel compuesto de 42 hojas y gráficas enlazadas para realizar las bases de datos alfanuméricos necesarios, todos los cálculos ya descritos, y la representación gráfica de resultados parciales y finales obtenidos. Para su diseño se utilizó la estructura esquematizada en la Figura 1, cuidando de facilitar la conformación de las alternativas tecnológicas de diferentes elementos de envolvente edilicia, la actualización de sus datos y el cambio de valores de determinadas variables (tasa de descuento, ciclo de vida, vida útil, confort, etc.), con el fin de permitir distintos análisis de sensibilidad. Su desarrollo se efectuó sobre la plataforma ETE-U (Blasco y Sulaiman, 2006) elaborada para determinar sólo los costos unitarios de inversión inicial relacionados con las características térmicas y sismorresistentes de 12 variantes de muros localizados en la ciudad de San Juan (Latitud: 31°32'04"S, Longitud: 68°32'36"O), la cual ya incorporaba bases de datos y cálculos térmicos previamente conformadas (Blasco, 2001). Las Figs. 5, 6 y 8 muestran capturas de pantalla con sectores de algunas de las hojas más significativas del nuevo programa PROMETE-U, aplicado al caso antes mencionado a modo ilustrativo de las prestaciones que el mismo brinda.

6. SOPORTE COMPUTARIZADO PROMETE-U

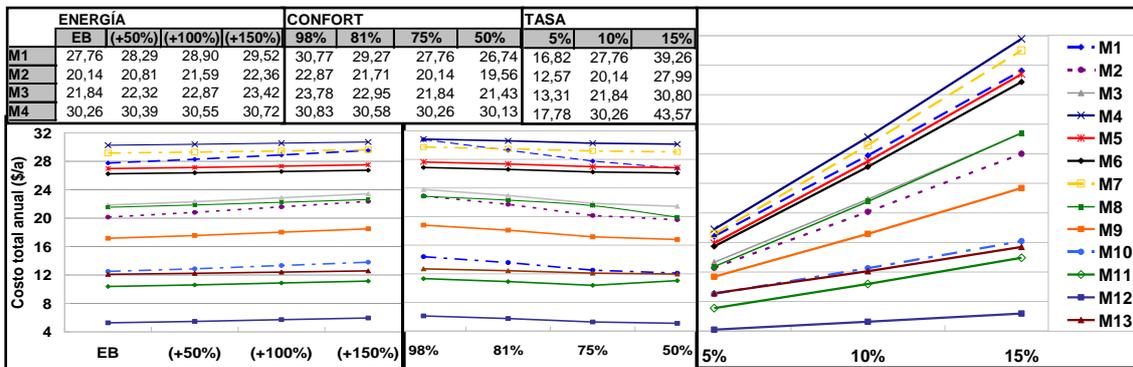


Fig. 4. Tabla Análisis de Sensibilidad y gráficas de Precio de la Energía, Tasa de Descuento y Confort.

ANÁLISIS DE ENVOLVENTE														
D	M1	DESCRIPCION	ESP.	U.	CANT.	\$/U.	\$Mat.	\$M.O	\$TOTAL	INC.	R	Ret Hs.	Amortig.	Transmitancia W/c²m²
3		1 Muro de ladrillo común 120u. 81l.	0,26	m2	120	0,80	105,21	39,18	144,39	61,01	0,33	5,50	0,24	
4		2 Revoque grueso	0,02	m2	1	7,00	7,00	11,86	18,86	7,97	0,02	0,43	0,89	
5		3 Revoque fino	0,01	m2	1	3,00	3,00	8,83	11,83	5,00	0,01	0,14	0,89	
6		4 costo de estructura portante/m²					45,28	16,31	61,59	26				F
7		5 SUB-TOTAL					170,18	79		0,00				
8		TOTAL							236,67	100	0,54	6,07	2,03	1,85
9														
10														
11														
12														
13	M2	DESCRIPCION	ESP.	U.	CANT.	\$/U.	\$Mat.	\$M.O	\$TOTAL	INC.	R	Ret Hs.	Amortig.	Transmitancia W/c²m²
14		1 Muro ladrillón, junta enrasada ext.	0,18	m2	32	1,10	39,87	27,58	67,44	42,22	0,22	3,39	0,44	
15		2 Revoque grueso												
16		3 Revoque fino												
17		4 costo de estructura portante												
18		5 SUB-TOTAL												
19		6 TOTAL												
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														
30														
31														
32														
33														
34														
35														
36														
37														
38														
39														
40														
41														
42														

Fig. 5. Ejemplos de planillas de datos y de cálculo de primer nivel en PROMETE-U. A: Datos de entrada, B: Mano de Obra, C: Estructura, D: Envolvertes, E: Resistencia, F: Transmitancia, G: Costo Inicial.

	M1	Enero			Febrero			Marzo			Abril			Diciembre		
4	K	TE	Ti	E (J/h)	TE	Ti	E (J/h)	TE	Ti	E (J/h)	TE	Ti	E (J/h)	TE	Ti	E (J/h)
5	0	25.5	25.5	0	24.7	24.7	0	22.1	22.1	0	17.2	19.0	-11929	25.3	25.3	0
6	1	24.9	24.9	0	24.0	24.0	0	21.4	21.4	0	16.7	19.0	-15596	24.4	24.4	0
7	2	24.7	24.7	0	23.2	23.2	0	20.7	20.7	0	16.1	19.0	-19468	23.5	23.5	0
8	3	24.3	24.3	0	22.5	22.5	0	20.2	20.2	0	15.6	19.0	-22528	22.8	22.8	0
9	4	23.6	23.6	0	22.0	22.0	0	19.7	19.7	0	15.2	19.0	-25571	22.1	22.1	0

26	21	31.5	29.2	15010	26.9	26.9	0	24.0	24.0	0	18.7	19.0	-2068	27.9	27.9	0
27	22	30.5	29.2	8339	26.1	26.1	0	23.3	23.3	0	18.2	19.0	-5643	26.9	26.9	0
28	23	30.3	29.2	7338	25.4	25.4	0	22.7	22.7	0	17.6	19.0	-9331	26.0	26.0	0
29	Qc/d	0		125415	-30482	2812	-12800	10929	-301724	0			-29881	22139		
30	Qc/m	0		3887854	-944956	87178	-396813	338812	-9353453	0			-926312	686312		
31			6													KWh

Fig. 6. Ejemplo de planilla de cálculo de segundo nivel. Energía Q requerida para mantener el confort.

Se diseñaron planillas de doble entrada de:

- datos: obtenidos de trabajos anteriores, de bibliografía especializada y del mercado local.
- cálculos intermedios de primer nivel: reducción a la unidad de superficie, límites de temperatura para rangos de confort, K, Q y caracterización sísmica.
- cálculos intermedios de segundo nivel: costos de inversión inicial de construcción y equipos, y mensuales y anuales de operación y mantenimiento.
- cálculos finales: costos anualizados por franja de confort y tasa de descuento.
- síntesis: extractos de resultados parciales y finales.
- figuras: diagramas de Pareto y lineales.

Fueron utilizadas las siguientes funciones internas del utilitario para programar los distintos cálculos del procedimiento:

- ✓ matemáticas (suma, resta, producto, división, y potencia, por registro y por factores fijos)
- ✓ estadísticas (promedio, máximo)
- ✓ lógicas (condicionales simples y anidadas)
- ✓ base de datos (vínculos directos entre celdas de una misma planilla y de diferentes planillas)
- ✓ financieras (VF: Valor Presente)
- ✓ gráficas (diagramas de barras, de líneas y combinados)

Las figuras 7 y 9 presentan algunas gráficas predefinidas:

edilicia, y por otro, en la consideración de diferentes aspectos (económicos, micro-económicos, térmicos, energéticos, sismorresistencia) en forma integral para realizar su valoración.

Los conceptos fundamentales sobre los cuales se basa, son relativamente simples, pero atienden a las especificidades de distintas disciplinas, habiendo requerido la elaboración de criterios apropiados para relacionarlos en forma correcta a través de la reducción a la unidad de superficie.

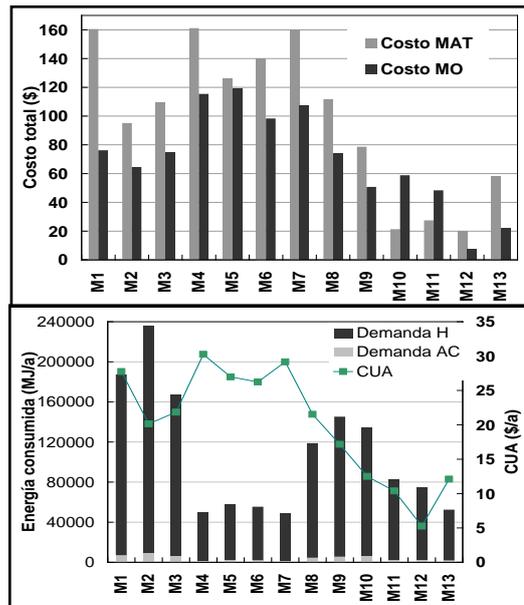


Fig. 7: CC totales (MAT y MO) y demanda de energía (H y AC)

7. CONCLUSIONES

La complejidad del procedimiento radica por un lado, en el análisis simultáneo de varias alternativas constructivas para tecnologías de elementos que componen la envolvente

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	
Detalle														
U W/m²K	1.85	2.33	1.66	0.49	0.56	0.54	0.48	1.16	1.42	1.63	0.81	0.73	0.51	
C. MAT	160.48	95.14	109.49	161.12	125.98	140.15	159.61	111.74	78.63	21.29	27.46	20.06	57.78	
C. MO	76.19	64.58	74.37	115.39	119.15	98.32	106.97	73.67	50.74	58.81	48.36	7.22	21.65	
Total Anual	236.67	159.73	183.86	276.51	245.12	238.46	266.58	185.41	129.36	80.10	75.82	27.28	79.43	
	Tasa de descuento 10%													
CUI	Costo de construcción													Costo total anual
	C. Unit. AC nec. W/h			C. AC				C. H				C. Oper. AC y H		
CUI	7			0.84				-0.37				1.21		27,76
	-9			1.46				0.13				1.21		
	0.84			23,87				1,46				1,21		
CUI	-0.37			1.46				0.13				1.21		20,14
	1.21			160,48				0,13				1,21		
	0.33			76,19				0,13				1,21		
CUI	-0.88			159,73				0,13				1,53		21,84
	1.21			109,49				0,13				1,08		
	1.46			74,37				0,13				1,08		
CUI	27,76			183,86				0,13				1,08		poco seguro
	27,76			183,86				0,13				1,08		
	27,76			183,86				0,13				1,08		
Resistencia sísmica	muy seguro	muy seguro	muy seguro	seguro	seguro	seguro	seguro	muy seguro	poco seguro	muy inseguro	inseguro	inseguro	poco seguro	

Fig. 8. Síntesis con esquemas de envolventes (muros) y tabla de cálculos de tercer nivel CUA..

Las ventajas que brinda su conformación consisten en que:

- 1) necesita pocos datos de entrada (temperaturas, tasa de descuento, y precios de materiales, mano de obra, equipos de climatización, y energía).
- 2) permite establecer el orden de preferencia económica de las alternativas de manera sencilla, propiciando una rápida comparación para realizar una selección fundamentada.
- 3) el análisis de los *Costos Unitarios Anualizados* sumado a la *Clasificación Sísmica* ajustan las valoraciones en forma cuali-cuantitativa. El primero da una idea precisa de la eficiencia de inversión por unidad de superficie y la segunda la complementa respecto de los requerimientos de seguridad sísmica de la zona.
- 4) la consideración de manera discriminada de los CCI, CO y CM y el porcentaje de incidencia de cada uno por tecnología, permite observar la dependencia o no a variables tales como los costos de la energía, o el impacto que ejercen los costos de construcción en el total obteniendo una elección económica integral de envolventes.
- 5) se consideran integralmente los costos incurridos durante el ciclo de vida. La metodología es aplicable a diferentes tipos de envolventes edilicias (cubiertas, muros, carpinterías, etc.) en diferentes contextos temporales y geográficos, tanto urbanos como rurales con variadas características climáticas y sísmicas.
- 6) es posible realizar distintos análisis de sensibilidad como por ejemplo a la variación de la tasa de descuento, aumentos del precio de la energía y diferentes requerimientos de confort.
- 7) además del resultado final de CUA -lo cual admite elegir la tecnología económicamente óptima- es viable discriminar la incidencia de cada costo en el total, al igual que el consumo energético que genera y su ponderación sísmica, permitiendo evaluar cada sistema constructivo de envolvente de manera holística y a la vez detallada lo cual posibilita modificar o mejorar la configuración del sistema constructivo analizado.
- 8) el soporte informático desarrollado es una herramienta valiosa para la automatización del análisis por unidad de superficie, que facilita la variación o actualización de los datos de entrada. Su utilidad ha sido probado exitosamente en una aplicación concreta.

Cabe mencionar que posee las siguientes limitaciones en el aspecto:

- a) *general*: ha sido desarrollada en base a una aplicación específica de variantes tecnológicas para muros.
- b) *térmico*: se realiza un cálculo estacionario considerando sólo la transferencia de calor por conducción, sin tener en cuenta las posibles ganancias/pérdidas por radiación y la dinámica de

acumulación/liberación de energía en la masa de las envolventes.

- c) *energético*: abarca la vida útil en la fase de uso de cada tecnología analizada, sin incorporar la energía embebida en las mismas y sus consecuentes costos.
- d) *micro-económico*: sólo aplica el índice de Valor Anualizado, sin utilizar otros frecuentes en la matemática financiera, tales como el Valor Actualizado Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Esta primera versión del procedimiento *PROMETE-U* constituye una sólida base que tiene numerosas posibilidades de mejoras futuras referidas a:

- ✓ incremento de índices de evaluación micro-económica con criterios de interrelación incorporados.
- ✓ aplicaciones en otros componentes de envolventes, por ejemplo: cubiertas y carpinterías.
- ✓ ampliación del espectro de estudio incluyendo costos ambientales, o energía incorporada en los materiales.
- ✓ mayor automatización y eficiencia del soporte computarizado, utilizando plenamente las potencialidades que ofrecen las funciones propias de MS-Excel.
- ✓ escenarios de análisis, contemplando diferentes grados de escasez de suministro de energía, o bien situaciones particulares tales como sistemas aislados (ej.: poblados), o que requieran alta prestación de confort interno (ej.: complejos turísticos).

La relevancia que tienen tanto las cuestiones ambientales como económicas al momento de tomar decisiones en la actualidad, ponderan el concepto de "ahorro" en energía y dinero en el presente y en el futuro, fundamentando el desarrollo de procedimientos y herramientas que faciliten no sólo la selección de variantes tecnológicas para componentes de envolventes edilicias, sino también la posibilidad de su optimización. La propuesta que se describe este artículo intenta ser una contribución en esta dirección.

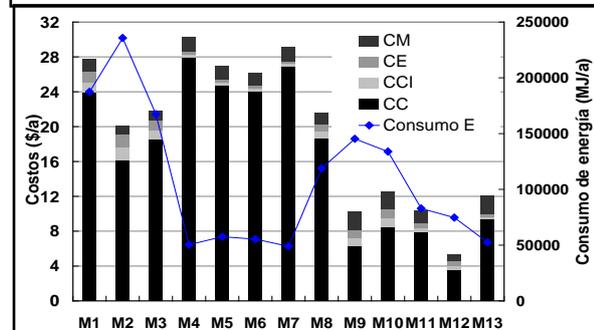
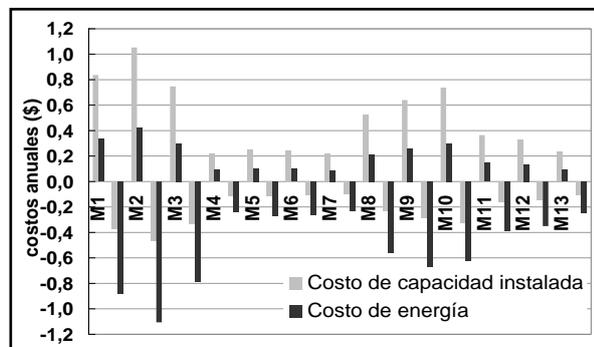


Fig. 9. Costos anuales de Capacidad Instalada y energía. Comparación del CUA con el consumo de energía total anual.

REFERENCIAS

- Al-Homoud, M. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment* 40 351–364
- Arboit, M., Arena, P. y de Rosa, C. (2008) Evaluación Térmica y Económica de Componentes Constructivos con Tecnologías Disponibles, en Viviendas Unifamiliares en La Región de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 12, pp. 01.97-01.104.
- ASHRAE, (2001) Standard 55–81in: Thermal Comfort Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta.
- Blasco I. (1997). Metodologías de evaluación de sistemas pasivos. Proyecto de Investigación UNSJ. Informe Final.
- Blasco I. (2001). “Mater-Monitor”. Base de datos térmicos de materiales de construcción. IRPha-FAUD-UNSJ.
- Blasco I., Sulaiman H. (2006). Procedimiento de evaluación térmica económica unitaria de envolventes edilicias de Zonas Áridas y Sísmicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 10, 05.167-173.
- Chandías M., Ramos J. (2004). Cómputos y Presupuestos: Manual para la construcción de edificios con computación aplicada. 10ª Edición. pp. 355-420. Librería y editorial Alsina. Bs. As.
- Clarke J.A., Yaneske P.P., Pinney A.A. (1991), The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials. BEPAC Research Report, Technical Note 91/6, UK.
- Duffie J., Beckman W. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc. USA. Pp. 453-484.
- Fernández J., Basso M., Mesa, A. and de Rosa, C. (2001), An assessment of the solar potential of the built environment in the city of Mendoza, Argentina. A study in advance. PLEA 2001- The 18th PLEA Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianópolis, Brazil.
- Filippín C., Flores Larsen S. (2005). Comportamiento térmico de invierno de una vivienda convencional en Condiciones reales de uso. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 9, 05.67-05.72.
- Filippín, C., Beascochea, A. y Gorozurreta, J. (2001). Residencias Universitarias Bioclimáticas en La Pampa. Resultados de su Comportamiento Térmico y Energético. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 5, pp. 05.01-05.06
- Martínez, C. (2005). Comportamiento Térmico-Energético de Envolvente de Vivienda en S. M. de Tucumán en Relación a la Adecuación Climática. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 9, pp. 05.01-05.06
- Marek L., Filippín C. (2003). Tecnologías de envolventes de edificios, Obra Inédita.
- Normas IRAM 11601 (2002). Aislamiento Térmico, Métodos de Cálculo
- Sapag Chain, N. y Sapag Chain, R. (2008) Preparación y evaluación de proyectos. Pp.317-321. Quinta edición. McGraw-Hill. Bogotá
- Selamet, S. (1995) A model proposal for determination the heat flow trough the building envelope according to the building form, M.S. Thesis, Technical University, Istanbul, , 6 pp.
- Simmonds P. (1993) Thermal comfort and optimal energy use, ASHRAE Transactions 99 (1) 1037–1048.
- UOCRA 2009, <http://www.uocra.org/>
- Velazquez Vila R., Alvarez Domínguez S. (1997). *ENERFICO 97 – La eficiencia energética en la edificación*. Grupo de Termotecnia, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Sevilla, España.