

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UNA VIVIENDA AUDITADA EN CONDICIONES REALES DE USO EN LA REGIÓN CENTRAL DE ARGENTINA

C. Filippín¹, E. Sipowicz² y S. Flores Larsen³

1. CONICET - Av. Spinetto 785, Santa Rosa, La Pampa, Argentina - Tel Fax : 54 (0) 2954 430910
2. Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE (AVE-CONICET), Igualdad 3585 - Villa Siburu - C.P. 5003 - Córdoba, Argentina.
3. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) – Universidad Nacional de Salta – CONICET, Avda. Bolivia 5150 (4400) Salta, Argentina

Recibido: 04-06-15; Aceptado: 21-07-15.

RESUMEN.- El objetivo general de este trabajo es: estimar la energía contenida y operativa de una vivienda compacta construida en el año 1975 y localizada en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa (latitud: 36.6°, longitud 64.3° y altura sobre el nivel del mar: 189m) en un clima templado frío de la región central de Argentina. Se analizó el consumo de energía total de la vivienda (gas natural y energía eléctrica) entre 1989 y 2009. Para completar la información de la energía operativa del período 1976-1989 se usó una ecuación de regresión lineal simple. En este trabajo los resultados muestran la participación de la energía contenida (inducida, gris e incorporada) y la operativa para satisfacer las necesidades básicas del usuario para un período de 34 años. El mejoramiento energético de la envolvente vertical para satisfacer la recomendación de la Norma IRAM pertinente a invierno significaría aumentar un 5% (de 12 a 17%) la energía contenida en los componentes tecnológicos más significativos de la vivienda. Ese incremento permite reducir un 28% el consumo de energía en calefacción pasando de 234 a 168 kWh/m² (120 kWh/m² para un edificio de bajo consumo) a pesar de que la envolvente vertical para las condiciones térmicas del aire interior estudiadas no satisface la certificación de etiquetado energético. En acuerdo con el ahorro de energía habría una reducción de las emisiones de CO₂.

Palabras Claves: Análisis de Ciclo de Vida - Energía contenida – Energía operativa – Ahorro de energía

LIFE CYCLE ANALYSIS OF AN AUDITED HOUSING UNDER REAL CONDITIONS OF USE IN THE CENTRAL REGION OF ARGENTINA

ABSTRACT.- The main objective of this work is to estimate the embodied and operating energy of a compact housing built in 1975, located in the city of Santa Rosa, La Pampa (latitude: 36.6°, longitude 64.3° and height above sea level: 189m) in a cold temperate climate. The housings total energy consumption (natural gas and electricity) between 1989 and 2009 was analyzed. To complete the lack of operating energy information for the period 1976-1989 a simple linear regression equation is used. The results of this work show the involvement of embodied (induced, gray and incorporated) and operating energy to meet the basic needs of the user during a period of 34 years. In order to meet the recommendation stated by the IRAM standard, the energy improvement of the vertical envelope would increase the embodied energy of the housings most significant technological components around 5% (from 12 to 17%). This increase reduces heating energy consumption from 234 to 168 kWh/m² (120 kWh/m² for a low - energy building) even when the vertical envelope doesn't meet the certification energy labeling. In accordance with the energy savings corresponds a reduction of CO₂ emissions.

Keywords: Embodied energy – Operating Energy – Energy saving

1. INTRODUCCION

La evidencia científica es ahora abrumadora: el cambio climático presenta graves riesgos globales, y exige una respuesta universal e integral urgente (Stern, 2007). El cambio climático, la amenaza más grave para la sociedad humana es, irónicamente, una amenaza que la sociedad humana ha creado a sí misma. Las concentraciones atmosféricas mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado desde 1750, en particular la del dióxido de carbono (CO₂). Las emisiones de CO₂ que se originan por la combustión de combustibles fósiles, en

conjunto con la emitida por la fabricación de cemento, son responsables de más del 75% del aumento del CO₂ atmosférico desde el siglo XVIII (Solomon, et al., 2007).

El rápido crecimiento a nivel mundial del consumo de la energía es preocupante por las dificultades de abastecimiento, el agotamiento de los recursos energéticos y los impactos ambientales. Las predicciones actuales muestran que esta tendencia creciente se mantendrá. La globalización, el mejoramiento de las condiciones de vida en las regiones emergentes que promueven el estilo de vida de las naciones desarrolladas condicionan el aumento del

consumo de la energía que producirá un impacto ambiental grave (Pérez-Lombard, et al., 2008). De acuerdo a la AIE (Agencia Internacional de la Energía) hay una tendencia cada vez mayor hacia la urbanización, situación que generará un aumento en el consumo de energía. Pérez-Lombard (2008) dice: siempre y cuando los recursos y el agotamiento del medio ambiente o la recesión económica lo permita.

La construcción de edificios, propia de un proceso creciente de urbanización, y la ocupación de ellos contribuyen significativamente en las emisiones globales de CO₂. Un cuarto del total de las emisiones globales de CO₂ son atribuibles al uso de la energía en los edificios (Metz, et al., 2007).

El consumo energético en el sector residencial oscila entre el 16 a 50% de la energía consumida por todos los sectores, y totaliza un promedio de aproximadamente un 31% a nivel mundial, como se muestra en la Figura 1 (Saidur, et al., 2007). Argentina, con un valor de alrededor de 25%, es un país energéticamente vulnerable debido a su alta dependencia de los combustibles fósiles. El 90% de la energía es proporcionada por el petróleo, el gas natural y el carbón. El consumo de electricidad y gas está aumentando cada año, diversos factores explican la tendencia: el aumento en el número de viviendas, la demanda de una mayor comodidad, y el aumento de aparatos eléctricos en los hogares. Es pertinente aclarar también que en los últimos años, y durante las estaciones extremas, los períodos fueron muy fríos o muy calientes. Como resultado, hubo restricciones al consumo de la electricidad y del gas natural usados con fines industriales para poder satisfacer las

demandas del sector residencial más vulnerable. Por ejemplo, entre 2001 y 2008 hubo un aumento del 34% en el consumo, junto con una disminución del 39% de las reservas naturales (Manzoni, 2009). También, es considerable el aumento, en los últimos años, en las ventas de aparatos de refrigeración, una situación que se acoplaría a las malas condiciones meteorológicas y por qué no a la aspiración de mejores condiciones de confort. Esta situación provoca un aumento gradual en el consumo de electricidad. De acuerdo con el Balance Energético de la Secretaría de Energía (Ministerio de Planificación, 2012), el 55% del consumo de electricidad en el país proviene de los sectores residenciales, comerciales y públicos. Todos estos factores contribuyen a hacer que el problema energético se agrave. El gas natural es la fuente principal de energía para calentar los edificios en la Argentina. Por otra parte, varios estudios han demostrado que el consumo de energía en los edificios residenciales en la Argentina es muy alto en comparación con los edificios en zonas climáticas europeas similares (González et al., 2007). La legislación pertinente para ahorrar energía en los edificios en Argentina no es obligatoria y los usuarios y los profesionales de la construcción no se identifican con los efectos de una muy baja eficiencia térmica en los edificios. Por lo tanto, sería necesario introducir innovaciones en el camino de la construcción, dando lugar a una diversificación de los materiales utilizados, así como la capacitación de mano de obra y profesionales, entre otros. Una casa bien aislada térmicamente que reduce los costes de mantenimiento, es una espiral virtuosa que permitiría una demanda en movimiento y el ahorro de recursos energéticos no renovables (Salveti et al., 2013).

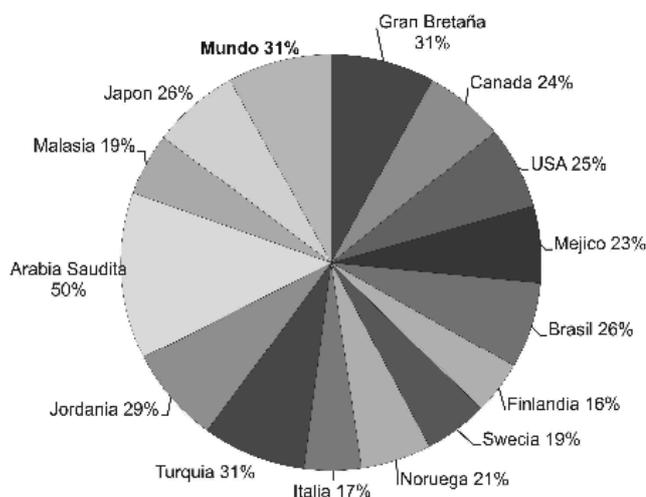


Fig. 1: Participación relativa del consumo de energía en el sector residencial. Fuente: (Saidur, et al., 2007)

Según (Swan, et al., 2009) el sector residencial es en gran parte un disipador de energía con una amplia variedad de tamaños de estructuras, geometrías y materiales en las envolventes. Además, el comportamiento de los ocupantes es muy variable y puede tener un impacto en el consumo de energía de alrededor de un 100% para una vivienda dada (Swan, et al., 2009); (Nawawi, et al., 2008); (Fabi, et al., 2012). Estos autores afirman que, en el reto de reducir el impacto ambiental, es muy importante entender las interacciones de los ocupantes con el ambiente interior y exterior con el fin de proporcionar las condiciones de confort en una forma más eficiente. Dado que un objetivo importante para el sector de la construcción es la producción

de edificios con un mínimo de impacto ambiental, el consumo de energía es un tema central, ya que representa uno de los recursos más importantes que se utilizan en los edificios durante su vida útil. Por lo tanto, para ayudar a controlar y comprender estas cuestiones, se requiere un mayor desarrollo de las estadísticas de energía.

En los últimos años, hubo un creciente interés en el estudio del uso de la energía en los edificios durante su ciclo de vida. Se divide principalmente en la producción (incluyendo todos los procesos de extracción de materias primas hasta el momento en que el material está listo para salir de la fábrica), montaje, operación, mantenimiento y demolición

(Thormark, 2002). Numerosos estudios demuestran que la operación representa la parte principal del uso de energía en la generalidad de las viviendas. La energía para la producción representa sólo alrededor del 10-15% en la mayoría de los casos (Adalbert, 1997) (Cole, 1996). La energía necesaria para la operación del edificio puede decrecer considerablemente mejorando la resistencia térmica de la envolvente, medidas que incrementan la energía usada en la fase de la producción, alrededor del 40 al 60% del total del ciclo de vida (Nielsen, 1995); (Winter, et al., 1999). Los estudios que consideran explícitamente las fases de construcción, demolición y transporte de los materiales muestran que la suma de la energía necesaria para estas fases se estableció en aproximadamente el 1% del total de la energía empleada en el ciclo de vida. En algunos trabajos, sin embargo, la energía para el transporte de los materiales se incluye en la definición de la energía incorporada inicial, lo que demuestra que no hay un acuerdo claro sobre cómo debe manejarse. Sólo unos pocos estudios incluyen la fase de materiales de construcción de reciclaje después de la demolición. Hasta hace pocas décadas se sabía que la energía operativa representa por lejos la mayor participación, alrededor de 90 a 95%, incluso cuando se considera sólo la demanda de calefacción (Sartori, et al., 2007). Un tema no menos importante es el referido a las pérdidas o desperdicios de materiales, que generalmente vienen acompañados del consecuente desperdicio de otros recursos asociados. Guarda Muñoz (2008) concluyó que el origen de las pérdidas más frecuentes de los materiales son: el corte de las piezas, el trabajo mal realizado, la falta de control de la calidad de los materiales y un mal acopio. Todas las pérdidas de materiales producen una baja en la productividad de la obra, pues cerca del 1% del total de la obra corresponde a pérdidas de materiales. La importancia del mantenimiento tampoco debe descuidarse. Su incidencia aumentará con la vida útil del edificio (Thormark, 2002).

Arena et al. (2001) realizaron un *Análisis comparativo del ciclo de vida de cubiertas alternativas utilizadas en viviendas residenciales en Mendoza (Argentina)*. Concluyen en su trabajo que el análisis del ciclo de vida permite determinar de modo objetivo cuáles son los materiales más benignos desde el punto de vista ambiental y energético. Permite además poner en evidencia los impactos

ambientales que cada elección de diseño determina, y rastrear los materiales o procesos que los causan, cuantificando su influencia. Afirman además que esto es muy importante, ya que muchas veces se tienen nociones equivocadas acerca de lo que es más benigno o más dañino para el ambiente, las que surgen de considerar sólo una parte del ciclo de vida completo de los objetos analizados. (Arena et al., 2001). En este contexto, el objetivo general del presente trabajo es estimar la energía incorporada y operativa de una vivienda compacta en un clima templado frío de Argentina. Los objetivos específicos son:

- Establecer la unidad de estudio y realizar un cómputo métrico de los componentes constructivos.
- Calcular la energía contenida de los componentes tecnológicos básicos.
- Analizar la energía operativa en función de los datos reales del consumo de energía.
- Predecir estadísticamente la energía consumida en período sin disponibilidad de datos.
- Calcular la energía requerida en calefacción de acuerdo a G para la vivienda tradicional y para la intervenida energéticamente durante el período 1976-2009.
- Estimar la participación relativa de la energía contenida y operativa para el período en estudio.
- Valorar el desempeño de la envolvente vertical

Se plantearon las siguientes premisas de trabajo: el análisis de ciclo de vida se centra sobre todo en la fase de funcionamiento del edificio (energía operacional) y fase de energía contenida (directa e inducida). Las fases de renovación y demolición no se tienen en cuenta debido a que durante el período analizado no hubo remoción de materiales y a que la vivienda se encuentra en muy buen estado de conservación cumpliendo recién 30 años de uso (

Fig. 2). Tampoco se considera la pérdida de material en el proceso de construcción y las redes de infraestructura (instalaciones eléctricas, sanitarias, y de gas). La carpintería tiene un marco de chapa con ventana corrediza con marco de aluminio y vidrio simple, y cortina de enrollar plástica con taparrollo sin aislación térmica.

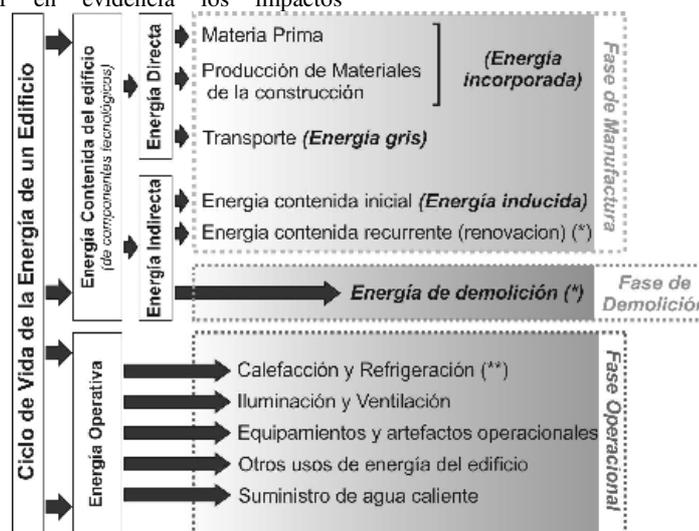


Fig. 2: Fases de análisis del ciclo de vida de la energía de un edificio. Elaboración propia en base a Lloyd Jones (2002) y Dixit et al. (2010). (*) No fueron tomadas en cuenta el presente trabajo. (**) La vivienda en estudio no posee refrigeración mecánica por lo que no fue considerado en el presente trabajo.

Tabla 1: Principales variables climáticas de la ciudad de Santa Rosa - La Pampa. Datos obtenidos de las estadísticas meteorológicas 1981-1990.

Valores anuales	Temperatura	media máxima	°C	23.4	
		media mínima		8.1	
		media		15.5	
	Humedad relativa		%	68	
	Radiación solar media anual sobre superficie horizontal			MJ/m ²	16.3
JULIO	Temperatura	mínima media	°C	1.5	
		media		7.6	
		máxima media		13.5	
		mínima absoluta		-5.9	
	Amplitud térmica			°C	12.0
Velocidad media del viento			Km/h	10	
Radiación solar media sobre superficie horizontal*			MJ/m ²	8.1	
Grados-día de calefacción (Tb = 18°C)				1545	
ENERO	Temperatura	mínima media	°C	31.0	
		media		23.8	
		máxima media		15.0	
		mínima absoluta		36.4	
	Amplitud térmica			°C	16.9
	Velocidad media del viento			Km/h	14
	Radiación solar media sobre superficie horizontal*			MJ/m ²	24.0
Grados-día de enfriamiento (Tb = 23°C)				449	

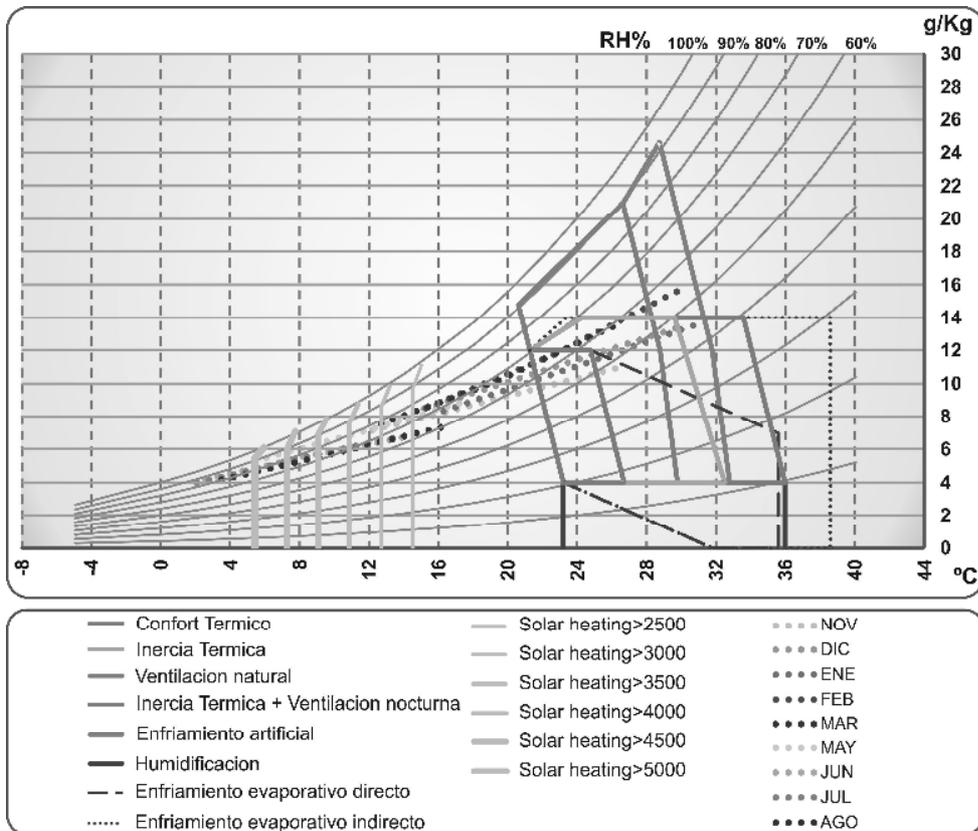


Fig. 4: Diagrama psicrométrico para la ciudad de Santa Rosa en donde se muestran los valores promedio mensuales mínimos medio y máximos de temperatura y humedad relativa.

En noviembre y marzo, la inercia térmica, ventilación natural y ventilación nocturna serían suficientes. En el caso de los valores de temperatura mínima media (máxima humedad), sería necesaria energía solar para calentar el aire interior y llegar a la zona de confort en todos los meses. Durante noviembre y marzo, se necesitarían valores de aproximadamente 3500 W/m² sobre superficies verticales orientadas al norte para llegar al confort. Durante el 25% del año, los edificios deben ser protegidos contra la radiación solar. En enero, febrero, marzo y diciembre de 11 am a 7 pm, las fachadas de los edificios deben estar en sombra para evitar el sobrecalentamiento y en noviembre de 12 a.m. a 7 p.m.

3. CASO DE ESTUDIO

3.1. Descripción arquitectónica.

La vivienda en estudio (Fig.) está emplazada en un barrio de baja densidad de edificación en el cual predomina la tipología compacta, entre medianeras y de un solo piso. La vivienda es de una sola planta y sin aislamiento térmico en

su envolvente. Las paredes exteriores son de ladrillo común de 0.30m de espesor con una transmitancia térmica (K) de 1.88 W/m² K. La estructura resistente de la cubierta es un forjado de viguetas pretensadas, bloques cerámicos y capa de compresión de hormigón, terminado con cubierta de teja francesa asentada con mortero (K = 1.00 W/m² K). De acuerdo a las categorías por tipo de edificio que establece el *New Method 5000* la vivienda es de alta inercia con un valor superior a los 400 kg/m². Las ventanas son de aluminio con cortina de enrollar y vidrio simple. El factor de exposición es del 73%. El índice de compacidad (I_c) es del 70% -relación entre el perímetro del círculo y el perímetro del proyecto- (Czajkowski et al., 1994). La norma (IRAM-11605, (1996) Mod. 2002) recomienda valores máximos de K para muros y techos, y para las distintas regiones bioambientales del país, valores que corresponden a dos niveles de confort higrotérmico (A y B). En la vivienda en estudio el valor de K del muro no alcanza el nivel menos exigente (Nivel B, K = 1.25 W/m²K). La transmitancia térmica del techo es superior al recomendado para verano por la misma Norma (K entre 0.19 y 0.48, niveles A y B, respectivamente).

Tabla 2: Indicadores dimensionales y energéticos

Perímetro (m)	Área útil (m ²)	Volumen (m ³)	Área Envolvente (m ²)		Ic (%)	Valor K envolventes (W/m ² K)		Valores máximos de K recomendados según IRAM 11605 para una Ted de -3°C equivalente a una T _{min} media de 1.5°C				G (W/m ³ °C)	Q aux (T° base 22°C) (kWh/año)
			Muro	Techo		Muro	Techo	Verano		Invierno			
								Muro	Techo	Muro	Techo		
30.89	39.10	140.7	70.62	43.25	70	1.88	1.00	A=0.50	A=0.19	A=0.33	A=0.29	2.36	8933.5 (Equivalente a 998 lts de kerosene o 1085 m ³ GN)
								B=1.25	B=0.48	B=0.91	B=0.74		

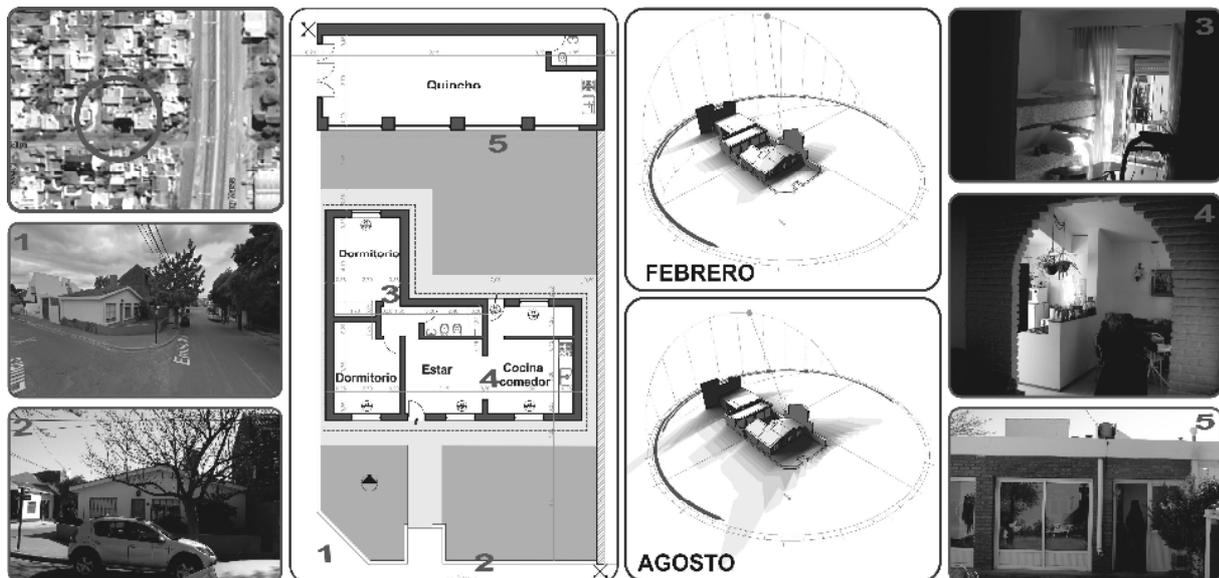


Fig. 5: Caso de estudio: Vivienda de tipología compacta emplazada en barrios de baja densidad edilicia de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

En un trabajo anterior (Sipowicz et al., artículo en revisión) se estudió en forma detallada el potencial de intervención energética a partir de la calibración de los datos medidos durante el monitoreo y la simulación térmica. El análisis de

los resultados del monitoreo experimental permitió observar que el invierno era la situación energética más comprometida. A través de la simulación y calibración se obtuvo el modelo termofísico de la vivienda en estudio y la

valoración de indicadores determinantes del consumo energético. Se optó, por razones proyectuales y tecnológicas, por la estrategia de conservación de la energía. La disponibilidad del área efectiva de vidrio al norte (solarización) no es suficiente para calentar los espacios y no es posible su incremento (desde un punto de vista funcional) debido a la escasa superficie de pared útil. A partir del modelo físico de la vivienda obtenido con la calibración de datos medidos y simulados se analizaron diferentes tecnologías de pared tri-capa de acuerdo con los antecedentes recogidos en los edificios bioclimáticos construidos y monitoreados en la región en estudio. Se definió para el estudio la incorporación sólo en el paramento exterior de una capa de telgopor de 0.05m de espesor para alcanzar un valor de K de 0.56 W/m²K, sin riesgo de condensación. Para esta situación el G es de 1.70 W/m³°C (G_{original} = 2.36 W/m³°C). Desde un punto de vista económico el período de recuperación de la inversión para el mejoramiento de la envolvente es adecuado sólo con un precio del fluido a precio promedio de los países limítrofes de Argentina.

3.2.Descripción energética.

La vivienda en estudio fue construida en la década del '70 (año de finalización: 1975). De acuerdo a la superficie de la envolvente (Tabla) y a sus componentes se estima el contenido energético para definir la energía incorporada de

acuerdo a la (IDAE, 1999). En cuanto a la metodología seguida para evaluar la energía operativa se tomó en cuenta que recién en 1989 la vivienda tuvo gas natural. Previo a este año, se usó kerosene para calefacción (según información de la dueña: 5 litros/día) y tubos de gas para calentamiento de agua y cocción de alimentos.

En la Fig. se observa un esquema conceptual de la metodología abordada. Para el presente trabajo se dispone de datos reales bimestrales del consumo del fluido (m³) y del consumo mensual de energía eléctrica (kWh), ambos desde 1989 sin interrupción. El hecho de trabajar con registro de datos de consumo de energía durante el ciclo de vida de la vivienda tiene, a menudo, problemas derivados de la ausencia de datos en la serie temporal. En este caso, debido al cambio de fluido. Esto implica una gran pérdida de información. El tratamiento estadístico de dichas series exige el relleno de los datos ausentes. En este trabajo se utilizó la función más simple para determinar la relación entre dos variables. La serie temporal de consumo de gas natural, incompleta durante el primer periodo sin acceso a la red, se reconstruyó a partir de una ecuación de regresión lineal simple (Y = a + b X) estimada por medio del método de "mínimos cuadrados". La ecuación se definió a partir de la regresión entre la tasa anual del consumo de gas natural a lo largo del periodo con acceso a la red (1989-2009).

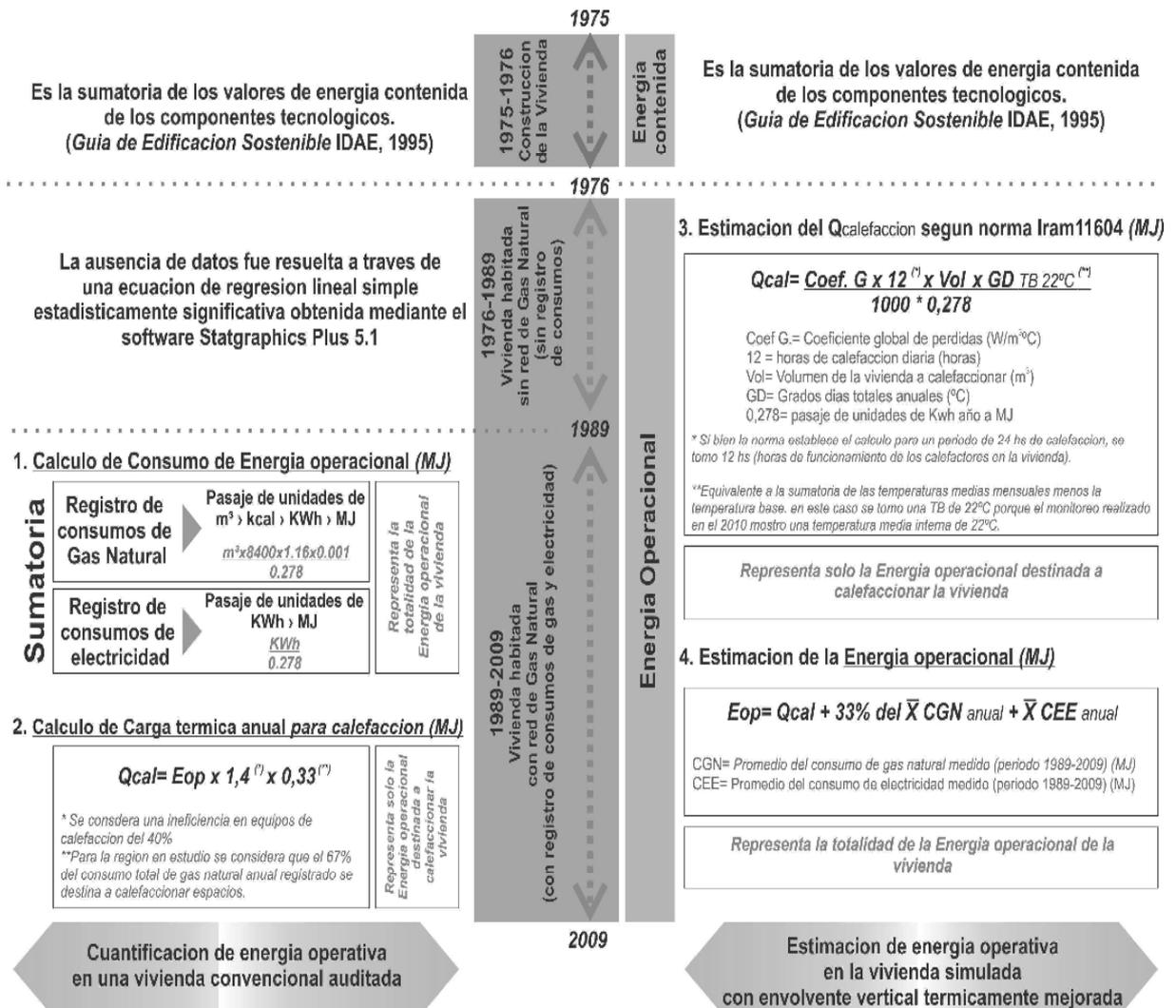


Fig.6: Esquema conceptual de metodología abordada. Elaboración propia

Posteriormente se evaluó la bondad de ajuste a través del coeficiente de determinación R^2 (% de la variación de Y que explica el modelo) y la significancia estadística del modelo a partir del ANOVA, cuyo resultado es sometido al estadístico de prueba F de Fisher. Una vez calculada la recta de regresión y comprobada la fuerza, el sentido y significancia estadística del modelo, se realizó la estimación de los valores de \dot{Y} en función del cambio unitario en los valores de X. Así, a partir de esta ecuación se calcularon los valores de la recta correspondientes al primer periodo sin acceso a la red (1976-1988), reemplazando el término independiente por los años de la serie histórica analizada y completando la nueva serie del consumo de gas natural de la vivienda.

Para la segunda parte del trabajo se calcula el valor de G y Q auxiliar (calefacción) entre 1976 y 2009 de acuerdo a los grados-días ($T_{base} = 22^\circ\text{C}$) de la vivienda tradicional e intervenida energéticamente. Previamente, a través de un análisis de correlación se observa que hay una relación estadísticamente significativa entre el valor del gas natural medido (67% destinado a calefacción) y el valor estimado con una eficiencia de los calefactores del 60%. El coeficiente de correlación es de 0.6288 con un P-valor de 0.0128 que verifica la importancia estadística de las correlaciones

estimadas. Estos valores permiten estimar parte de la energía operativa (Qcal) para todo el periodo de acuerdo al G.

4. RESULTADOS

La Tabla muestra el contenido energético de los rubros más significativos de la vivienda. De acuerdo a los valores obtenidos el contenido energético total de la vivienda en estudio es de 5835.4 MJ/m^2 . En la estimación de la energía contenida de la vivienda, no se tuvo en cuenta el rubro de infraestructura (instalación eléctrica, sanitaria y de gas). Para Cepeda Gutiérrez et al. (2010) el contenido energético para una vivienda unifamiliar con sótano estudiadas en España es de alrededor de 5873 MJ/m^2 . Los autores afirman que en estas viviendas repercute en el valor la incorporación de sótano por la necesidad de utilizar hormigón armado para la ejecución de los muros de sótano y que supone un gasto energético considerable en el coste global.

4.1. Energía operativa

Las Tablas 4, 5 y 6 muestran los consumos reales de energía.

Tabla 3: Estimación del contenido energético de los componentes tecnológicos de la vivienda

Ítem	Densidad (kg/m ³)	Energía primaria (MJ/kg)	Según Tabla 2		Volumen (m ³)	Peso (kg)	Energía incorporada (MJ)
			Perímetro (m)	Área (m ²)			
Muro de ladrillo macizo	1800	2.85	-	70.62	22	38135	108684
Muro de cemento corrido	1800	2.85	30.89	24.70	7.5	13345	38032
Encadenado inferior y superior de H ^o A ^o (k=1.65 W/m ² °C)	2500	0.99	61.60	-	3.85	9625	9592
I	Ladrillo Hueco	1000	2.96	43.25	5.19	5190	15362.40
	Capa de compresión (hormigón)	2500	0.99	43.25	2.20	5406.25	5352
	Teja	2000	2.85	43.25	.20	86500	12326.25
Revoque exterior e interior	-	1.34	-	141.24	-	5649.6	7570.50
Pintura	20 kg/m ²	1.40 MJ/m ²	-	-	-	2824	3953.60
Carpintería (k=3.90 W/m ² °C)	-	2440 MJ/m ²	-	11.50	-	-	28060
TOTAL							228870

La Figura 7 muestra los resultados del modelo de regresión lineal simple que describe la relación entre la serie de tiempo y el consumo de energía medido. La ecuación del modelo ajustado es

$$y = -1.05921E6 + 541.8 * x$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 99%. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 66.2841% de la variabilidad en el consumo de energía. El coeficiente de correlación es igual a 0.814151, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. A partir de la ecuación se estima el consumo anual total de energía operativa para el período faltante 1976-1988. La Fig. 8 muestra la energía contenida y operativa en el período del ciclo de vida analizado (1976-2009). La participación relativa de la energía contenida en el período es de alrededor del 12%, en acuerdo con Sartori et

al. (2007) quienes consideran que la energía operativa varía entre el 90 y 95%.

4.2. Vivienda tradicional e intervenida energéticamente.

De acuerdo a los párrafos anteriores se estima el consumo de energía en calefacción (Q_{aux}) de acuerdo a los grados día anuales base 22°C ($GD_{T_{base}=22^\circ\text{C}}$). Los resultados se observan en la Figura 9. El valor obtenido no contempla eficiencia de los calefactores, por eso y de acuerdo a la bibliografía, se incrementa el valor en un 40%.

La participación relativa de la energía contenida en el período analizado pasa del 12 al 17% en la vivienda intervenida energéticamente sólo con mejoramiento de la resistencia térmica de la envolvente vertical opaca ($K = 0.56 \text{ W/m}^2\text{°C}$, entre 0.33 y 0.91, nivel A y B sugerido por la IRAM 11605, respectivamente). La Fig.10 muestra el valor de la energía contenida en los dos casos estudiados y los valores sugeridos los autores de acuerdo a la bibliografía. El

consumo anual de energía en calefacción para una temperatura media de 22°C es de 168.3 kWh/m² de superficie útil, valor que significaría un 30% de ahorro anual de energía.

De acuerdo a las características tecnológicas y térmicas de la envolvente vertical de la vivienda original y tomando como

referencia la norma IRAM 11900 (2009), y para una temperatura interior de 22°C, la temperatura superficial media interior es de alrededor de 9.4°C valor que supera ampliamente los 4°C que sugiere el nivel H (envolvente energéticamente ineficiente). La envolvente vertical mejorada térmicamente arroja un valor de 6.5°C.

Tabla 4: Consumo de gas natural (m³) entre 1989 y 2009.

Año	Bimestres						Total anual	Indicadores estadísticos		
	1	2	3	4	5	6		Promedio bimestral	STD	CV
1989	34.0	87.0	513.0	336.0	305.0	76.0	1351.0	225.2	189.4	84.1
1990	43.0	93.0	448.0	441.0	360.0	70.0	1455.0	242.5	193.6	79.8
1991	51.0	51.0	441.0	652.0	405.0	103.0	1703.0	283.8	251.4	88.6
1992	51.0	126.0	519.0	632.0	376.0	124.0	1828.0	304.7	239.6	78.6
1993	45.0	116.0	408.0	645.0	458.0	108.0	1780.0	296.7	241.4	81.4
1994	53.0	92.0	385.0	592.0	380.0	100.0	1602.0	267.0	217.5	81.5
1995	48.0	115.0	439.0	567.6	327.0	81.1	1577.7	263.0	214.0	81.4
1996	49.3	96.3	361.8	541.1	279.3	101.8	1429.6	238.3	191.4	80.3
1997	43.7	63.3	264.3	605.1	358.2	185.6	1520.1	253.4	209.5	82.7
1998	45.7	60.6	443.4	461.6	431.0	80.1	1522.4	253.7	210.4	82.9
1999	40.5	146.1	434.8	573.8	428.5	113.7	1737.4	289.6	216.7	74.8
2000	43.6	115.5	403.9	648.6	621.2	162.9	1995.7	332.6	263.7	79.3
2001	44.5	105.2	412.4	673.1	512.5	131.7	1879.3	313.2	255.9	81.7
2002	47.4	126.6	417.7	676.1	445.6	145.8	1859.2	309.9	242.3	78.2
2003	43.4	100.3	515.5	850.0	510.7	43.8	2063.6	343.9	332.6	96.7
2004	45.8	53.8	456.1	683.7	352.2	107.8	1699.4	283.2	258.8	91.4
2005	48.0	78.2	493.1	767.7	391.9	59.1	1838.0	306.3	295.0	96.3
2006	45.0	46.3	499.7	917.1	592.6	110.8	2211.4	368.6	358.7	97.3
2007	43.2	58.2	577.2	1059.3	555.9	188.0	2481.7	413.6	394.5	95.4
2008	49.2	52.1	484.9	1061.4	608.6	102.7	2359.0	393.2	405.1	103.0
2009	34.1	37.1	412.5	598.7	478.9	120.5	1681.8	280.3	246.4	87.9
Promedio	45.2	86.6	444.3	665.8	437.0	110.3	1789.3			
STD	4.9	31.3	66.6	183.0	99.8	37.7	300.3			
CV	10.8	36.1	15.0	27.5	22.8	34.2	16.8			

Tabla 5: Consumo de electricidad (kWh) entre 1989 y 2009.

Año	Meses												Total anual	Indicadores estadísticos		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		X	STD	CV
1989	154	49	101	151	106	102	56	10	57	69	83	117	1055	88	42.5	48.3
1990	123	66	69	85	120	118	83	97	142	38	92	108	1141	95	29.1	30.6
1991	86	106	77	60	92	93	77	76	85	94	86	77	1009	84	11.8	14.0
1992	98	104	104	87	131	118	106	103	102	109	105	129	1296	108	12.5	11.6
1993	62	109	97	99	96	113	113	114	101	91	87	99	1181	98	14.5	14.7
1994	98	99	93	94	111	114	99	29	110	114	116	113	1290	107	10.9	10.1
1995	100	105	111	115	132	120	139	138	130	129	119	116	1454	121	12.6	10.4
1996	190	122	120	127	126	130	132	134	120	104	115	117	537	128	21.2	16.5
1997	141	149	141	126	18	180	160	170	140	117	144	143	1729	144	19.1	13.3
1998	156	141	155	218	06	213	234	227	207	199	193	180	2330	194	25.5	3.2
1999	218	194	188	181	186	180	251	229	190	189	161	157	2324	194	27.0	13.9
2000	157	150	181	183	206	213	234	227	207	199	193	180	2330	194	25.5	13.2
2001	199	177	193	147	130	174	170	189	211	213	204	261	268	189	33.8	17.9
2002	300	227	169	149	155	168	188	180	165	201	159	156	2217	185	42.6	23.0
2003	175	204	196	199	190	198	193	205	221	171	138	158	2248	187	23.0	12.3
2004	162	154	158	157	156	171	153	165	161	149	155	155	1896	158	5.9	3.8
2005	219	213	178	168	129	179	70	66	83	81	139	147	1672	139	4.4	39.1
2006	170	161	154	152	157	155	163	196	196	225	191	177	2097	175	22.8	13.0
2007	197	204	171	193	179	170	182	118	187	191	187	160	2139	178	22.7	12.7
2008	195	175	180	180	148	196	187	176	213	192	174	195	2211	184	16.2	8.8
2009	216	203	167	185	183	195	62	129	190	183	182	160	2055	171	40.9	23.9
X	158.3	145.6	143.7	146.2	143.7	155.3	143.5	147.3	149.3	144.4	142.3	146.3	1766	1472	249	178
STD	58.4	50.5	39.9	42.3	35.3	38.8	56.9	56.1	49.5	54.5	39.8	40.0	472	39.3	12.3	10.5
CV	36.9	34.7	27.8	28.9	24.6	25.0	39.7	38.1	33.2	37.8	27.9	27.4	26.7	26.7	49.4	58.7

Tabla 6: Consumo total de energía operativa en MJ.

Año	Gas natural			Electricidad (kWh)	Total	
	m ³	kcal	kWh		kWh	MJ
1989	1351.0	12222000	3941	1055	4715	16959
1990	1455.0	14305200	4613	1141	5082	18282
1991	1703.0	15355200	4952	1009	5622	20224
1992	1828.0	14952000	4822	1296	6248	22474
1993	1780.0	13456800	4340	1181	6003	21593
1994	1602.0	13253016	4274	1290	5630	20250
1995	1577.7	12008472	3872	1454	5728	20604
1996	1429.6	12768840	4118	1537	5409	19459
1997	1520.1	12788160	4124	1729	5847	21031
1998	1522.4	14594412	4706	2283	6407	23046
1999	1737.4	16763544	5406	2324	7030	25289
2000	1995.7	15786036	5091	2330	7736	27827
2001	1879.3	15617028	5036	2268	7358	26469
2002	1859.2	17334240	5590	2217	7253	26091
2003	2063.6	14274960	4603	2248	7838	28194
2004	1699.4	15438780	4979	1896	6499	23379
2005	1838.0	18575508	5990	1672	6651	23923
2006	2211.4	20846448	6723	2097	8087	29091
2007	2481.7	19815432	6390	2139	8862	31876
2008	2359.0	14126952	4556	2211	8601	30939
2009	1681.8	11348400	3660	2055	6611	23779

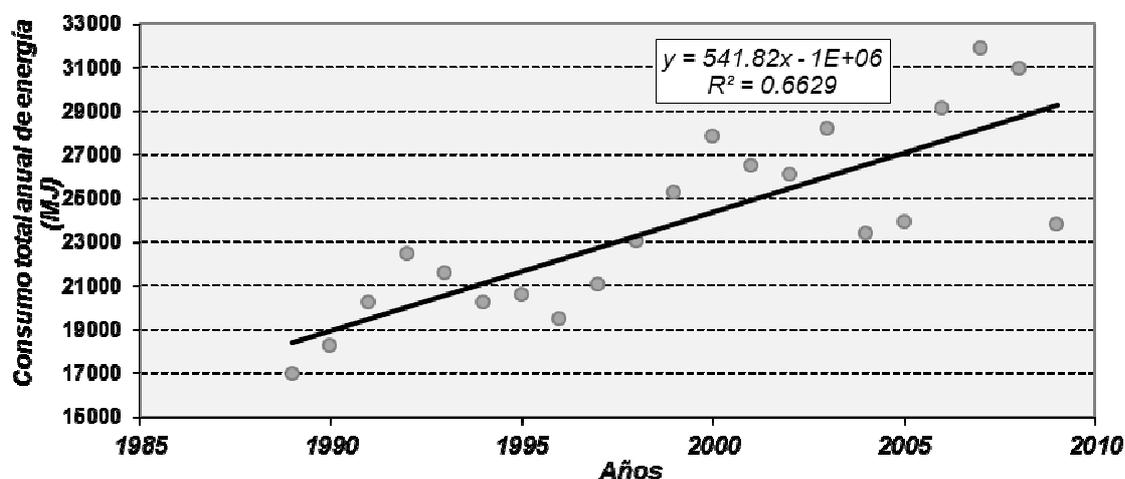


Fig. 7: Modelo de regresión lineal simple: relación tiempo/consumo de energía medido

5. CONCLUSIONES

El desarrollo del trabajo permitió cumplir con los objetivos planteados y descriptos en el inicio.

Se ratifica la elección de la unidad de estudio (vivienda unifamiliar) para evaluar, en una primera aproximación, el ciclo de vida. La vivienda fue elegida entre una muestra ya estudiada en trabajos anteriores, cuya auditoria (disponibilidad cuali-cuantitativa de información técnico-energética) y monitoreo energético (evaluación higrotérmica y disponibilidad del consumo diario de energía por lectura de medidor) en condiciones reales de uso no suponían dudas

ni ambigüedades. Posteriormente, la misma fue simulada y calibrada térmicamente; y se analizó su potencial de intervención para disminuir el consumo de energía. Por razones tecnológicas (evitar roturas en paredes existentes para aumentar superficie de ventana al norte) y funcionales (disponibilidad de área útil para ubicación de muebles) no se contempló la solarización de la vivienda de acuerdo a las recomendaciones de diseño según Givoni para ingresar a la zona de confort. Sólo se consideró el mejoramiento energético de la envolvente vertical. Se estudió el sobre-coste de la intervención y su período de recuperación. El estudio facilitó los pasos seguidos en el presente trabajo

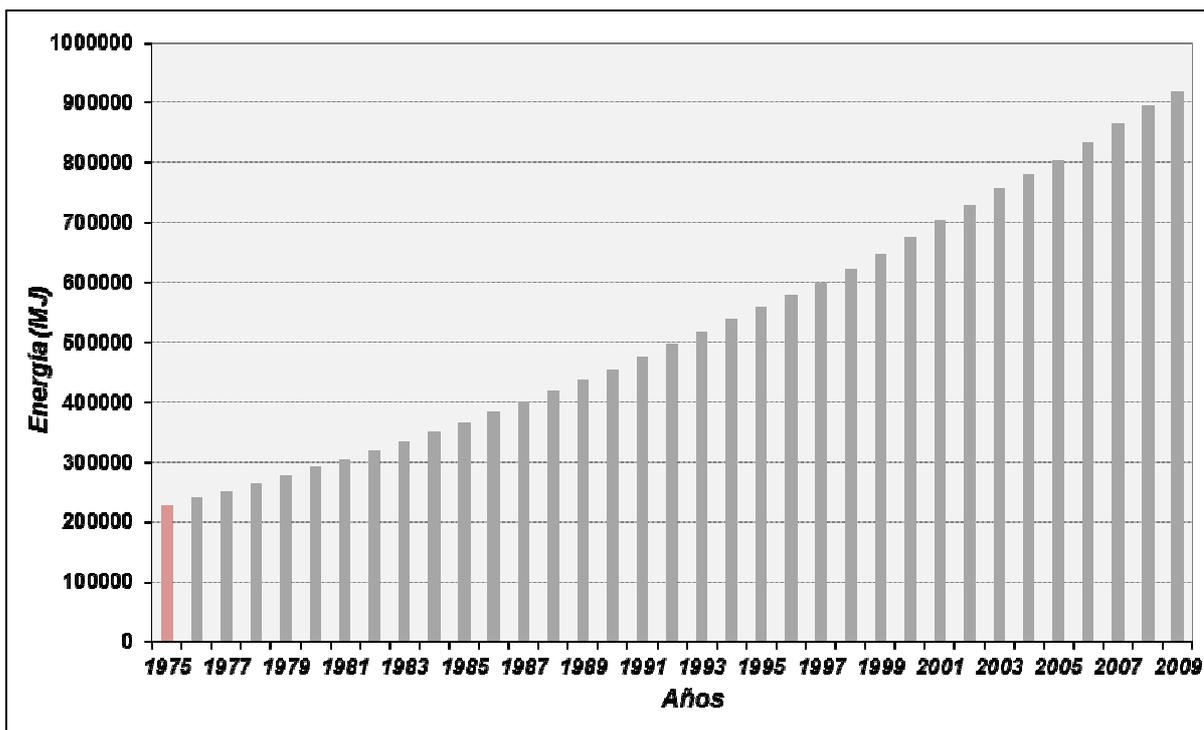


Fig. 8: Consumo de energía total de la vivienda. Energía contenida y operativa entre 1975 – 2009. Periodo '76-'88 de acuerdo a Figura 7. Periodo '89-'09 auditada.

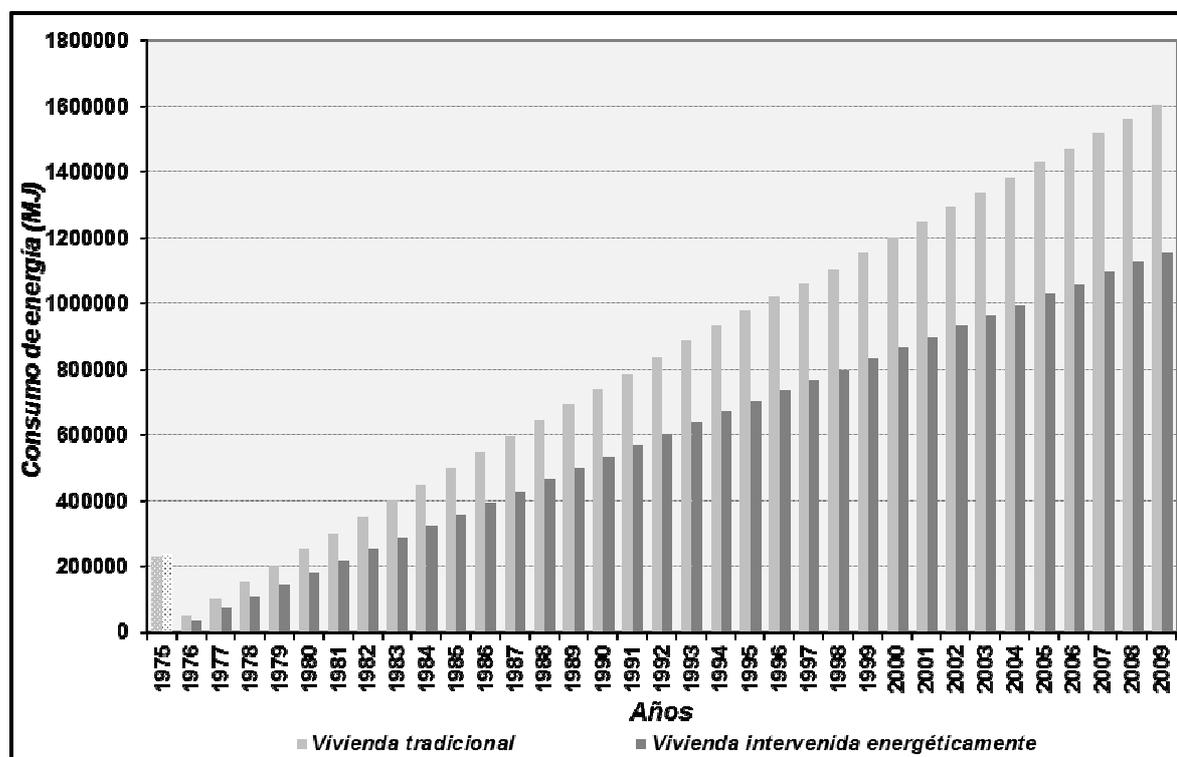


Fig.9: Comparación del consumo de energía total entre la vivienda tradicional e intervenida energéticamente. Hacia la izquierda, año 1975, se encuentra graficada la energía contenida (Punteado gris: vivienda tradicional; punteado blanco: vivienda intervenida energéticamente). Hacia la derecha la energía operacional de las mismas correspondiente al periodo 1976-2009.

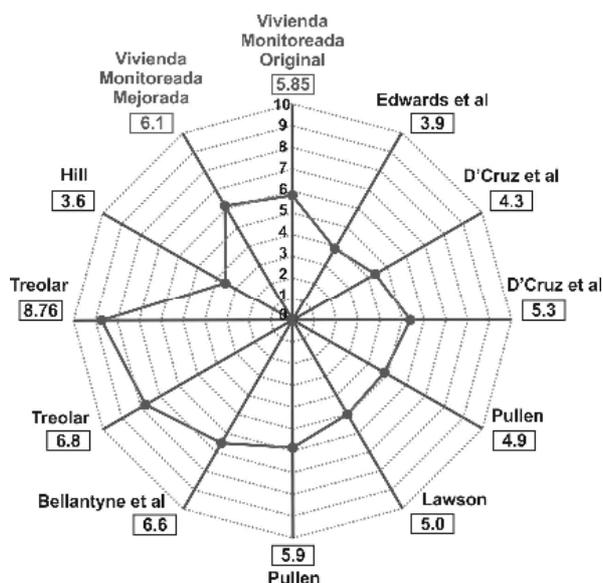


Fig.10: Diferentes valores de energía contenidas (GJ/m²) en edificios residenciales. Grafico realizado tomando como referencia a Ding, G. (2004) citado en (Dixit, et al., 2010).

En este trabajo los resultados muestran la participación de la energía contenida (inducida, gris e incorporada) y la operativa para satisfacer las necesidades básicas del usuario para un período de 34 años. Los valores obtenidos acuerdan con los datos alcanzados por diferentes autores para distintas localizaciones geográficas. El mejoramiento energético de la envolvente vertical para satisfacer la recomendación de la Norma IRAM pertinente (invierno) significaría aumentar de un 12 a un 17% la energía contenida en los componentes tecnológicos más significativos de la vivienda. Ese incremento permite reducir un 28% el consumo de energía en calefacción pasando de 234 a 168 kWh/m² (en acuerdo con Sartori et al., 2007) que establece un consumo de 120 kWh/m² para un edificio de bajo consumo) a pesar de que la envolvente vertical para las condiciones térmicas del aire interior estudiadas no satisface la certificación de etiquetado energético. En acuerdo con el ahorro de energía habría una reducción de las emisiones de CO₂.

Monkiz Khasreen et al. (2009) concluyen en su trabajo que la evaluación del ciclo de vida de los edificios está menos avanzada que en otras áreas, por lo que los investigadores están trabajando para mejorar las posibilidades de adopción de ACV como herramienta de apoyo en la toma de decisiones dentro de la etapa de diseño. Las metodologías están establecidas y en su mayoría accesibles a los usuarios, pero todavía hay muchos impedimentos para ser empleadas en el diseño de edificios y deberían ser consideradas en la agenda de investigación. Una de las principales restricciones es el proceso de producción complicado, y su ciclo de vida largo con fases de análisis basadas en supuestos.

Las autoras del presente trabajo acuerdan con Khasreen, Banfill, and Menzies. Consideran además que para minimizar los efectos de una producción complicada y las suposiciones propias de un ciclo de vida tan amplio, el diseño debería ser integrador reforzando la etapa del pre-diseño y la simulación térmica-lumínica, o la rehabilitación energética a partir de un monitoreo detallado, una auditoría energética y una simulación y calibración de datos medidos

con el fin de minimizar la imprecisión de la información, la imprevisibilidad y lo imponderable.

REFERENCIAS

- Adalbert K. (1997). Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: examples. *Building and Environment*, **32**, 321-329.
- Arena P., Basso M. and Fernandez Llano J. (2001). Análisis comparativo del ciclo de vida de cubiertas alternativas utilizadas en viviendas residenciales en Mendoza (Argentina) *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **5**, 73-78, 0329-5184.
- Auliciems A. and Szokolay S. (2007). Thermal Comfort, Note 3. PLEA Notes. 2nd. - ISBN 0 86776 729 4.
- Cepeda Gutiérrez and Mardaras Larrañaga. (2010). Cuantificación energética de la construcción de edificios y el proceso de urbanización. *Conarquitectura*, **12**, 65-80.
- Cole J. (1996). Life-cycle energy use in office buildings. *Building and Environment*, **31**(4), 307-317.
- CPE-Cooperativa Popular de Electricidad. (2014). *Memoria y Balance*. Ejercicio Económico y Social.
- Czajkowski J.D. and Gómez A.F. (1994). Diseño bioclimático y economía energética edilicia. Fundamentos y métodos. Editorial U.N.L.P.
- Dixit Manish Kumar et al. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, **8**, 42, 1238-1247.
- Fabi V. (2012). Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment*, **58**, 188-198.
- González A.D. et al. (2007). Residential energy use in one-family households with natural gas provision in a city of the Patagonian Andean region. *Energy Policy*, **35**, 2141-2150.
- Gonzalo G. (2003). Manual de Arquitectura Bioclimática, p. 489. Tucumán, Argentina.
- Guarda Muñoz Jaime Mauricio (2008). Estudio para minimizar las pérdidas de materiales en obras de edificación en extensión. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento.
- IADIZA - CONICET (2010). Índices de Aridez climática para Argentina.
- IDAE Instituto para la diversificación y ahorro de energía. (1999). *Guía de la edificación sostenible*. España.
- IRAM (1996). Norma 11603. Clasificación bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina.
- IRAM (1996). Norma 11605 - Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Buenos Aires, Argentina.
- Lloyd Jones David (2002). *Arquitectura y entorno. El diseño de la construcción bioclimática*. Editorial Blume, Barcelona.
- Manzoni C. (2009). La Energía para este invierno. *Diario La Nación*, Sección Economía, pág. 01-02. Fecha de consulta 24 de mayo.
- Metz B. et al. (2007). Climate Change. Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Fourth Assessment Report (AR4), Cambridge University Press.

- Monkiz Khasreen Mohamad , Banfill Phillip F.G. and Menzies Gillian F. (2009). Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review sustainability. - 2009. - Vol. 1. - pp. 674-701.
- Nawawi A. H. and Khalil N. (2008). Post-occupancy evaluation correlated with building occupants'satisfaction: An approach to performance evaluation of government and public buildings. *Journal of Building Appraisal*, **4**, 59–69.
- Nielsen P. Et al. (1995). Energi- og miljøanalyser af bygninger (In Danish). Energy - and environmental analysis of buildings. SBI-meddelelse 108. Hørsholm,Denmark : Danish Building Research Institute.
- Omer A.M. (2009). Energy efficiency, climate change, buildings and the need for development in renewable energy use. *Buildings and the environment*. Nova science publishers, New York
- Pérez-Lombard L., Ortiz J. and Pout C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and building*, **40**, 394-398.
- Saidur R., Masjuki H.H. and Jamaluddin M.Y. (2007). An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia. *Energy Policy*, **35**, 1050–1063.
- Salvetti M. B., Czajkowski J D. and Gomez A. F. (2013). Indicators of energy efficiency in buildings. Comparison with standards in force in Argentina. *Open Journal of Energy Efficiency*, **2**, 163 - 170.
- Sartori I. and Hestnes A.G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, **39**, 249-257.
- Secretaría de Energía, Ministerio de planificación (2012). Balance Energético Nacional. Tecnología de la Información. Capital Federal, Argentina.
- Sipowicz E., Pipa D., Filippín C. (2015). Dwelling's energy saving in a cold temperate climate of Argentina, through the experimental study and modeling of technological interventions. *Energy Efficiency*. Artículo en revisión.
- Solomon S. et al. (2007). Climate Change: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4). Cambridge University Press.
- Stern N. (2007). The Economics of Climate Change: Stern Review. Cabinet Office HM Treasur.
- Subsecretaría de Planeamiento. (1994). Análisis de la Realidad, pág. 156. Gobierno de La Pampa.
- Swan L. G. and Ugursal V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 1819–1835.
- Thormark C. (2002). A low energy building in a life cycle – its emided energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*, **37**, 429-435.
- Winter B.N. and Hestnes A.G. (1999). Solar versus green: The analysis of a Norwegian row house. *Solar Energy*, **66** (6), 387-393.