

Demanda de calefacción y refrigeración en edificios: comparación entre un modelo paramétrico y un edificio auditado

Camporeale, Patricia⁽¹⁾, Czajkowski, Jorge⁽¹⁾, Mercader Moyano, Pilar⁽²⁾

- (1) Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, pcamporeale@fau.unlp.edu.ar; 005491167365525
- (2) Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Escuela Superior Técnica de Arquitectura, Sevilla, España

Resumen El crecimiento de la población urbana con el aumento de la demanda energética, entre otras consecuencias, provoca la suba de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al Cambio Climático. La eficiencia energética en los edificios es imprescindible para reducir dicha demanda manteniendo niveles de confort aceptables para el usuario. Los edificios destinados a uso residencial, comercial y administrativo consumen más de un tercio de la energía primaria producida en Argentina, porcentaje similar al resto del mundo. Las nuevas tecnologías digitales para solucionar este problema combinan la proyección arquitectónica con la simulación de la performance energética, entre ellas, el diseño paramétrico. Este se ha transformado en una valiosa herramienta para encarar tareas complejas como ser el diseño de edificios eficientes, donde se requiere considerar materiales, energía e información. Este procedimiento permite reunir todas estas variables en un único proceso transparente, haciendo de la demanda energética una cuestión determinante en las decisiones proyectuales tempranas. En este trabajo se comparan la demanda en calefacción de un día típico de invierno con la demanda obtenida a partir de una vivienda energéticamente rehabilitada auditada por nuestro Laboratorio, a fin de calibrar el nuevo modelo. Asimismo se calcula la demanda de refrigeración para su posterior comparación con el edificio auditado.

Palabras clave Modelo paramétrico, Eficiencia energética, Auditoría energética

1 Introducción

A medida que las ciudades incrementan su población, su demanda energética aumenta también, provocando una suba de las emisiones de gases de efecto inverna-

dero (GEI) que contribuyen al Cambio Climático. Como los edificios consumen más de un tercio de la energía primaria producida en Argentina (BEN, 2013), un porcentaje similar al resto del mundo (IEA, 2010), es imprescindible reducir su consumo energético mediante la eficiencia.

Las nuevas tecnologías digitales unen la proyectación arquitectónica con la simulación de la performance energética. Podemos encontrar numerosos ejemplos de herramientas digitales basadas en la simulación energética a fin de integrar ambos campos (Nembrini et al., 2014). El diseño paramétrico se ha transformado en una valiosa herramienta para encarar tareas complejas como el diseño de edificios eficientes, donde materiales, energía e información son intercambiados con el contexto (Hensel et al., 2010). Este procedimiento permite reunir todas estas variables en un único proceso transparente, haciendo de la demanda energética una cuestión determinante en las decisiones proyectuales de edificios eficientes en las primeras fases de diseño (Bambardekar, 2009).

En este caso, nos valemos de la auditoría energética de una vivienda para calibrar nuestro modelo digital, validando así los resultados obtenidos.

2 Metodología

2.1 Descripción del edificio auditado

Este trabajo toma como base los resultados obtenidos a partir de la auditoría de una vivienda situada en la zona norte del Gran La Plata a fin de someterla a una rehabilitación energética que disminuya el consumo de energía en calefacción (Berardi et al, 2016).

La zona donde se encuentra el edificio es la IIIb templada cálida húmeda según la norma IRAM de clasificación bioambiental de la República Argentina (IRAM 11603, 2011). Los veranos tienen una temperatura media máxima de 28,5 °C y los inviernos una mínima media de 6,7 °C (IRAM 11603, 2011).

El edificio tiene una superficie cubierta de 175 m² desarrollados en una planta y se encuentra exento en el terreno. El entorno es de baja densidad y similares características a esta vivienda.

Los muros son de ladrillo hueco con revoque de cal exterior e interior con un $K=1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$, superando el nivel C de la Norma IRAM 11605 de valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos (IRAM 11605, 1996). La mejora consiste en la incorporación de un sistema de aislación térmica conocido como *External Insulation Finishing System* (EIFS) que consta de poliestireno expandido de 50mm con una densidad de 30kg/m³, una malla de fibra de vidrio y un revoque cementicio exterior de 8mm. Esta mejora se aplicó solamente al muro

curvo que delimita los dormitorios, obteniendo un nuevo $K = 0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$. El muro alcanza el nivel B y se acerca al nivel A ($A \leq 0,38 \text{ w/m}^2\text{K}$) (Fig. 1)



Fig. 1 Vista S del muro rehabilitado

Las cubiertas planas son de losa de hormigón armado ($H^{\circ}A^{\circ}$) con una transmitancia térmica $K=1,59 \text{ W/m}^2\text{K}$. Las cubiertas inclinadas son de chapa de hierro prepintada con estructura de madera y aislante de polietileno aluminizado de burbujas de aire sobre machimbre de 1", con una transmitancia térmica igual a $3,64 \text{ W/m}^2\text{K}$. No alcanzan el nivel C de dicha norma que se fija en $1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Como podemos observar, no alcanzan a cubrir el nivel B exigido para los edificios en la Provincia de Buenos Aires de acuerdo a la Ley de Eficiencia Energética (Ley 13059, 2003). Esta ley incorpora la norma IRAM 11605, entre otras, para determinar el nivel mínimo exigible en cerramientos opacos en dicha jurisdicción. La mejora realizada en los techos inclinados fue la incorporación de 100mm de lana de vidrio en la cara interior de los mismos y el agregado de machimbre de PVC, con un $K= 0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$. Las cubiertas superan el nivel B casi alcanzando el nivel A ($A \geq 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$) de la norma de referencia.

Las aberturas son de chapa BWG n°18 con vidrio laminado 5+5 ($K= 5,86 \text{ W/m}^2\text{K}$) y en las ventanas superiores, los vidrios son DVH ($K= 3,82 \text{ W/m}^2\text{K}$). En el primer caso no cumplen con la mencionada ley que incorpora la norma IRAM 11507/4 (Norma IRAM 11507/4, 2010) cuyo mínimo K admisible está fijado en $4 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La ocupación del edificio es de cuatro personas en el horario de 17 a 12 hs de lunes a viernes y en el horario de 12 a 17 se encuentra desocupada. Los fines de semana, se considera ocupada de 0 a 24 hs. Para nuestra estimación, consideramos un día de semana por su incidencia estadística de 5 sobre 7 días.

La vivienda cuenta con un equipo de climatización por aire de gas natural. Consta de un equipo calefactor Goodman de 24000 Kcal/h y una máquina enfriadora Goodman, y el tendido de la cañería de distribución se realiza mediante conductos de chapa a la vista de sección circular con aislación térmica interna.

2.2 Construcción del modelo paramétrico

Para la parametrización del edificio y el cálculo de la demanda de calefacción y refrigeración se empleó una herramienta digital— ya diseñada previamente y exhaustivamente descrita (Camporeale, 2012) — que contempla la demanda del edificio para un día típico de invierno y de verano (Camporeale et al., 2015).

La base de datos climáticos corresponde a la estación meteorológica Vantage Pro 2 que el LAYHS posee en la localidad de Gonnet y que forma parte de la red de la Universidad Nacional de La Plata. Los datos de temperatura se consideraron desde 2008 hasta 2015. Con esos datos se calcularon las temperaturas máxima y mínima medias para días típicos de invierno y verano. Se obtuvieron las temperatura horarias utilizando el programa MODTEM (Gonzalo, 2003). La temperatura de confort interior de invierno se fijó en 20°C, al igual que en la auditoría energética. En la misma, las renovaciones de aire fueron estimadas en 1,2/h. El volumen de aire del edificio es de 458m³. Se emplearon los coeficientes de transmitancia térmica provistos en el trabajo de referencia (Berardi, 2016). La temperatura de confort de verano se fijó en 25°C.

2.3 Cálculo de la demanda de calefacción

Se consideraron las condiciones de la vivienda antes y después de la rehabilitación energética. La demanda de calefacción se calculó para cada hora del día mediante la suma algebraica de pérdidas y ganancias térmicas. El procedimiento es similar al empleado por la Norma IRAM 11659/1 y 2 (IRAM 11659/1, 2004) (IRAM 11659/2, 2007) para el cálculo de la demanda de refrigeración con la diferencia que no solo se considera la hora pico solar sino el día completo. Se cambió, la temperatura exterior considerada para los cerramientos opacos en las normas citadas por la temperatura *sol-aire*, para las horas en que hay radiación solar, que es cuando muestra incrementos. Consideramos las pérdidas y ganancias a lo largo de un día típico de invierno “Ec. 1”:

$$Q_{CAL} = Q_c + Q_r + Q_a + Q_o + Q_s \quad (1)$$

Q_{CAL} = pérdidas y ganancias térmicas para un día típico de invierno en W

Q_c = pérdidas térmicas de la envolvente en W

Q_r = pérdidas por infiltración en W

Q_a = pérdidas por ventilación en W

Q_o = ganancias internas en W

Q_s = ganancias solares en W

Analizando cada término, se obtiene que "Ec.2":

$$Q_c = \sum_{i=0}^n \Delta t_{iSA} \cdot (K_m S_m + K_c S_c) + \sum_{i=0}^n \Delta t_i K_v S_v + P_p \cdot 24 \quad (2)$$

Q_c = pérdidas térmicas por conducción de la envolvente en W de la sumatoria de cada hora del día

Δt_{iSA} = diferencia entre temperatura sol-aire y de confort en muros y cubiertas para cada hora del día

$n = 24$

K_m = transmitancia térmica del muro en W/m^2K

S_m = superficie de muros en m^2

K_c = transmitancia térmica de la cubierta en W/m^2K

S_c = superficie de las cubiertas en m^2

Δt_i = diferencia de temperatura exterior y de confort para cada hora del día en $^{\circ}C$

K_v = transmitancia térmica de las ventanas en W/m^2K

S_v = superficie de las ventanas en m^2

P_p = pérdidas por piso en contacto con el terreno en W

El siguiente término corresponde a las pérdidas por infiltración de las carpinterías "Ec. 3":

$$Q_r = 0,35 \cdot n_{ren} \cdot V \cdot 24h \quad (3)$$

Q_r = pérdidas térmicas por infiltración en W

0.35 = capacidad específica del aire en Wh/m^3K

n_{ren} = número de renovaciones de aire por hora en $1/h$

V = volumen de aire del edificio en m^3

Analizamos el siguiente término "Ec.4":

$$Q_a = \sum_{i=1}^n C_{AR} \cdot (0,25 \cdot \Delta t_i + 0,61 \Delta w) \quad (4)$$

Q_a = es el calor sensible del aire interior, en W

C_{AR} = caudal de aire a renovar en m^3/h

0.25 = constante entre el cociente del calor específico del aire a $21^{\circ}C$ y 50% de humedad relativa HR y su volumen específico en $W/m^3^{\circ}C$

Δt_i = diferencia entre la temperatura exterior y la interior en $^{\circ}C$ para cada hora del día.

0,61= la constante que resulta del cociente entre el valor medio de la cantidad de calor cedida por la condensación de un gramo de vapor de agua y el volumen específico de la misma mezcla de aire en W/m³.g

Δw = diferencia entre la humedad específica del aire exterior y la humedad específica del aire interior en g/kg

Se consideran a continuación las ganancias solares “Ec. 5”

$$Q_s = F_s \cdot K_v \cdot \sum_{O \in O} A_{V_o} \cdot \sum_{i=1}^n I_{s_{oi}} \quad (5)$$

Q_s = ganancias solares a través de los elementos vidriados exteriores en W

F_s : es el factor de exposición solar

K_v : transmitancia térmica en W/m²K

A_{V_o} : área de ventanas en m²

O = {Norte, Sur, Este, Oeste}

$I_{s_{oi}}$: radiación sobre el plano según su orientación

$n=24$

En último término, se tienen las ganancias internas (Ec. 6):

$$Q_{oSL} = \sum_{i=1}^n (Q_{i\ perS} + Q_{i\ perL} + Q_{i\ illumS} + Q_{i\ equipS} + Q_{i\ condS}) \quad (6)$$

Q_{oSL} =calor latente y sensible por fuentes internas: personas, equipamiento, iluminación y conductos en W.

$Q_{i\ perS}$ = calor sensible de las personas en W

$Q_{i\ perL}$ = calor latente de las personas en W

$Q_{i\ illum}$ = ganancias internas por iluminación en W

$Q_{i\ equip}$ = ganancias internas del equipamiento en W

$Q_{i\ condS}$ = ganancias internas por conductos en W

$n= 24$

No se consideran las ganancias internas por equipamiento.

Esta demanda se discrimina en los diferentes componentes de la envolvente a fin de comparar los resultados obtenidos en la auditoría antes y después de la rehabilitación energética con los obtenidos mediante nuestro programa.

El período de medición de la auditoría fue desde el 17 de julio al 4 de agosto de 2014. Se midió el consumo de gas de ese período y se calcularon las pérdidas por grado Centígrado con el programa AuditCAD (Berardi et al., 2016) para la envolvente antes y después de la rehabilitación energética.

2.4 Cálculo de la demanda de refrigeración

La demanda de refrigeración se calcula de la misma forma que la de calefacción (Camporeale et al, 2016) “Ec. 7”:

$$Q_{REF} = Q_c + Q_a + Q_o + Q_s \quad (7)$$

Q_{REF} = ganancias térmicas para un día típico de verano en W

Q_c = ganancias de la envolvente en W

Q_a = ganancias por ventilación en W

Q_o = ganancias internas en W

Q_s = ganancias solares en W

Analizando cada término, se obtiene que “Ec.8”:

$$Q_c = \sum_{i=1}^n \Delta t_{iSA} \cdot (K_m S_m + K_c S_c) + \sum_{i=1}^n \Delta t_i K_v S_v \quad (8)$$

Las referencias son similares a las de la “Ec. 2”

El siguiente término corresponde a las ganancias por ventilación (Ec. 9):

$$Q_a = \sum_{i=1}^n C_{AR} \cdot (0,25 \cdot \Delta t_i + 0,61 \Delta w) \quad (9)$$

Las referencias son similares a las de la “Ec. 4”.

Se consideran a continuación las ganancias solares “Ec. 10”:

$$Q_s = F_s \cdot K_v \cdot \sum_{o \in O} A_{V_o} \cdot \sum_{i=1}^n I_{s_{oi}} \quad (10)$$

Las referencias son similares a las de la “Ec. 5”.

En último término, se calculan las ganancias internas (Ec. 11):

$$Q_{oSL} = \sum_{i=1}^n Q_{i \text{ perS}} + Q_{i \text{ perL}} + Q_{i \text{ ilumS}} + Q_{i \text{ equipS}} + Q_{i \text{ condS}} \quad (11)$$

Las referencias son similares a las de la “Ec. 6”.

Al igual que en el caso de la demanda de calefacción, no se consideran las ganancias internas por equipamiento.

3 Análisis de los resultados

Los resultados de la demanda de calefacción calculada según la herramienta digital propia, se analizan de acuerdo a las pérdidas y ganancias por elemento de la envolvente: muros, cubiertas y vidrios discriminados por orientación a lo largo del día, antes y después de la rehabilitación energética (Fig. 2) (Tabla. 1).

Como podemos observar en la Tabla 1, las ganancias internas para nuestro caso de estudio resultan irrelevantes en el cómputo de las cargas térmicas, debido a la baja ocupación de la vivienda.

Comparamos a continuación los resultados obtenidos por ambos programas (Fig. 3). Las ganancias solares no son consideradas en el programa AuditCAD pero sí en nuestro programa. AuditCAD calcula las pérdidas térmicas por grado Cen-

tígrado ($W/^{\circ}C$) y nuestro programa, la demanda energética (kW por día típico), por lo cual la comparación solamente es posible a nivel porcentual.

Los porcentajes de las pérdidas de AuditCAD fueron calculados a partir de los datos del trabajo citado (Berardi et al, op.cit.). Se infiere que las diferencias entre los resultados no superan el 5,7%. En las cubiertas es donde se manifiesta esta diferencia, no sucediendo lo mismo con los muros donde la diferencia es de 1,49%. La diferencia en el porcentaje total ponderado de las pérdidas es de 3,65% entre ambos programas.

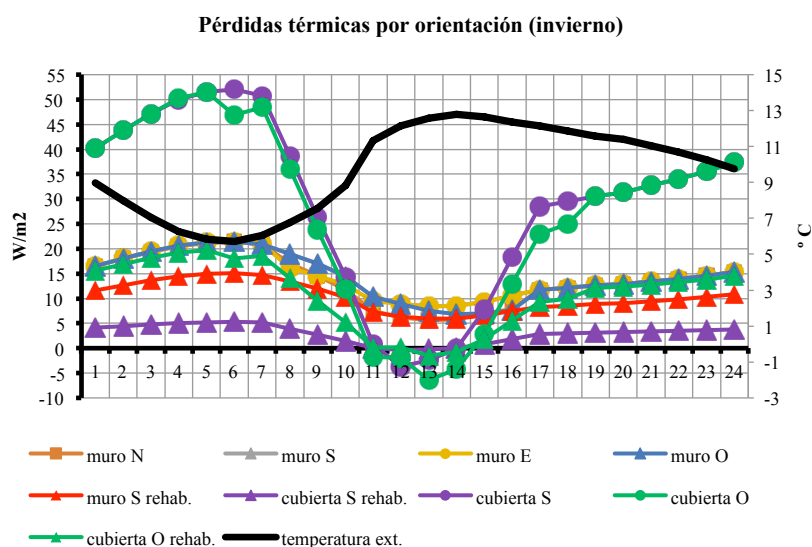


Fig. 2 Pérdidas térmicas por fuentes y temperatura horaria (invierno)

No se comparan las pérdidas por infiltración porque no fueron auditadas sino estimadas a partir de los datos de la auditoría. La diferencia entre ambos programas es notable a pesar de considerar la misma cantidad de renovaciones horarias. Las pérdidas por orientación según el programa paramétrico son de 2,14% respecto del total de las pérdidas, mientras que según AuditCAD representan el 24,12% para 1,2/h.

No se han podido comparar los resultados de la demanda de refrigeración con datos auditados de la vivienda porque estos aún están siendo procesados. La demanda de refrigeración obtenida en el programa paramétrico se muestra en la Fig. 4. Las pérdidas por las cubiertas mejoradas reflejan la disminución de dicha demanda en un 96,15% mientras que en los muros es 3,85%. Dichas pérdidas no son significativas porque el área energéticamente rehabilitada no es relevante respecto del total: $16,72m^2$ sobre $172,49m^2$ (16,72%).

Tabla 1 Pérdidas y ganancias de la vivienda antes y después de la rehabilitación energética (invierno)

Ganancias y pérdidas térmicas	Original kW x día típico de invierno	Mejorada kW x día típico de invierno	Disminución de la demanda %
Solares	-188,22	-188,22	0
Internas	6	6	0
Ventanas	82,65	82,65	0
Infiltración	4,62	4,62	0
Piso	29,60	29,60	0
Cubiertas	75,06	47,01	37,38
Muros	58,87	51,70	12,17
Total pérdidas	293,59	255,40	14,04
Total pérdidas y ganancias	111,38	73,18	

Tabla 2 Comparación porcentual de pérdidas térmicas en los elementos rehabilitados energéticamente (invierno)

Elementos de la envolvente	S/programa paramétrico	s/AuditCAD	Diferencia %
Cubiertas	37,38%	43,08%	-5,70%
Muros	12,17%	10,68%	1,49%
Total ponderado	14,04%	17,69%	-3,65%

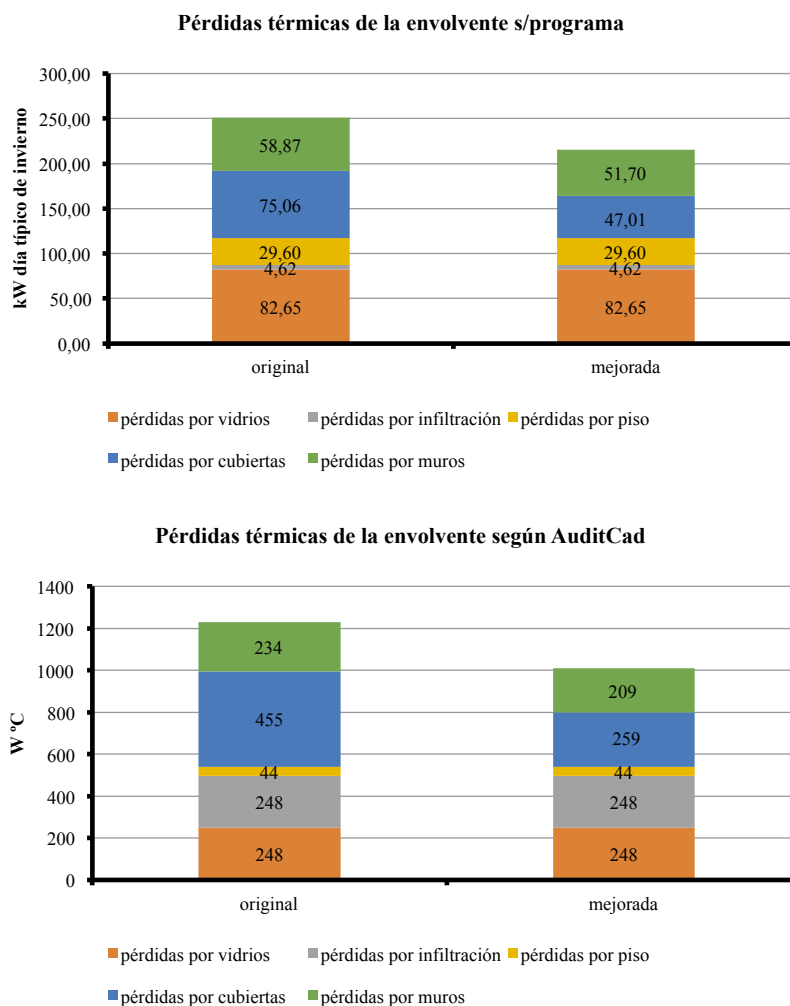


Fig. 3 Pérdidas térmicas s/ programa y s/AuditCAD (invierno)

4 Conclusiones

Estos resultados nos permiten inferir que nuestro programa se encuentra bien calibrado respecto a los resultados de esta auditoría. Aun así, deberían auditarse las pérdidas por infiltración, ya que se obtuvieron diferencias notables entre ambos programas.

La validación de esta herramienta de evaluación energética permite que sea aplicable a proyectos de edificio, pudiéndose conocer de antemano una estimación de las demandas de calefacción y refrigeración en las primeras etapas de diseño. Se trata de un análisis en estado estacionario que no demanda mucha cantidad de tiempo ni grandes recursos computacionales para su cálculo a diferencia de una simulación que requiere mayor definición proyectual e insume mayores costos profesionales.

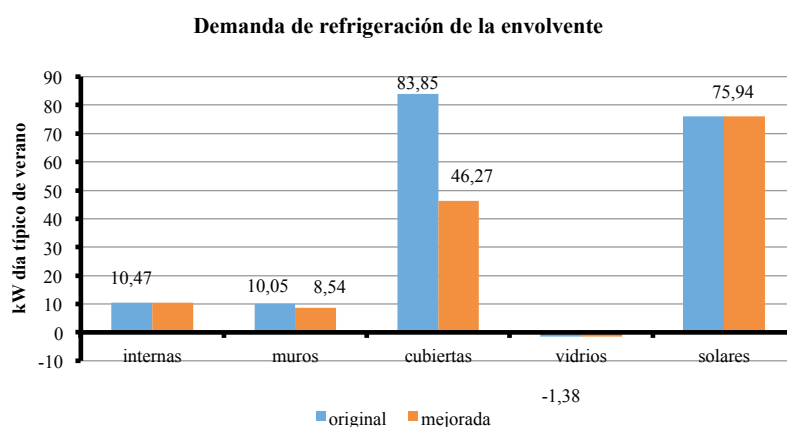


Fig. 4 Demanda de refrigeración para un día típico de verano

5 Referencias

- Bambardekar, S., Ute Poerschke-(2009) The architect of energy simulation in the early design stage- Eleventh International IBPSA Conference Proceedings, pp. 1306/13-Glasgow, Scotland July 27-30, 2009
- Berardi, R., Czajkowski, J. D., Diulio, M. P., & Netto, G. R. (January 01, 2016). Impacto de la envolvente en la demanda de energía en calefacción residencial de la región metropolitana de La Plata, tomando como caso testigo el reciclado energético de una vivienda. *Ambiente Construido*, 16, 1, 55-70.
- Camporeale, P. (2012) El uso de algoritmos genéticos en el diseño paramétrico de edificios energéticamente eficientes: El coeficiente G y el consumo anual de energía- Actas del XV Congreso Ibérico & X Congreso Iberoamericano de Energía Solar, Junio 19-22, 2012 Vigo, Galicia, España, Vol. 1, 2012, ISBN 978-84-615-9055-1. 27-32
- Camporeale, P. Czajkowski, J. (2015) Índice Bioambiental de consumo energético en edificios aplicado a un modelo de diseño paramétrico. Actas del II Congreso Internacional y IV Congreso Nacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-eficientes. Sevilla, 25 al 27

de mayo 2015. Editado por María del Pilar Mercader Moyano ISBN 978-84-617-3964-6. 1^o ed. Sevilla España. 640-651

Camporeale, P. Czajkowski, J. (2016) Environmental index of energy demand in buildings. Optimization of a parametric model- 4th International Conference on Advances in Civil, Structure and Mechanical Engineering CSM'16- Institute of Research Engineers and Doctors (IRED). Birmingham- 17/18 marzo 2016

Czajkowski, J. (1999) Desarrollo del Programa AuditCAD para el análisis de edificios a partir de auditorías ambientales Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA) Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente ISSN 2314-1433 <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php> Consultado el 21/8/16

Gonzalo, G. E., & Nota, V. M. (2003). Manual de arquitectura bioclimática. Argentina: Nobuko.

Hensel, M., Menges, A. y Weinstock, M. (2010). Emergent technologies and design. Oxon, Reino Unido, Routledge

Ley 13059 (2003) Decreto Reglamentario 1030/2010 de la Provincia de Buenos Aires. Condiciones de Acondicionamiento Térmico exigibles en la construcción de edificios. <http://www.gob.gba.gov.ar/dijl/index.php?var=63528&out=1&recurso=1>. Acceso en: 03 nov. 2015.

Nembrini, J., Samberger, S., & Labelle, G. (2014). Parametric scripting for early design performance simulation. *Energy & Buildings* 68, 786-798.

Norma IRAM 11507/4 (2010) Carpintería de obra y fachadas integrales livianas. Ventanas exteriores. Parte 4: Requisitos complementarios. Aislación térmica. 2^o edición. Buenos Aires. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

Norma IRAM 11603 (2011) Acondicionamiento Térmico de Edificios- Clasificación bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires. Instituto Argentino de Normalización y Certificación

Norma IRAM 11605 Norma IRAM 11605 (1996) Acondicionamiento Térmico de Edificios- Condiciones de habitabilidad en edificios. Buenos Aires Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

Norma IRAM 11659 1 (2004). Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: Vocabulario, definiciones, tablas y datos para determinar la carga térmica de refrigeración- Buenos Aires Instituto Argentino de Normalización y Certificación-

Norma IRAM 11659 2 (2007). Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración Parte 2: Edificios para viviendas- Buenos Aires Instituto Argentino de Normalización y Certificación-

Agradecimientos

Agradecimientos al Arq. Berardi por la foto de la casa proporcionada para este trabajo