

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE VENTANAS MULTIACIMUTALES EN LA CIUDAD DE MENDOZA MEDIANTE PROTOTIPOS A ESCALA 1:1 Y EL PROGRAMA ENERGY PLUS.

Gustavo Barea^{1,4}; Alfredo Esteves^{2,4}; Carolina Ganem^{3,4}; Silvana Flores Larsen^{2,5}

⁴Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV), (INCIHUSA)
Centro de Ciencia y Técnica (CCT) (CONICET)
Avda. Ruiz Leal s/n Parque General San Martín (5500), Mendoza, Argentina.

⁵Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales
INENCO-Universidad Nacional de Salta-CONICET
Avda. Bolivia 5150 (4400) Salta

E-mail : gbarea@mendoza-conicet.gov.ar

RESUMEN.

El comportamiento de los sistemas de aventanamiento y su implicancia en el consumo energético, constituyen una preocupación creciente en el mundo actual, donde las normativas y la concientización sobre el impacto del consumo energético en edificios promueven la adopción de estrategias de optimización del diseño arquitectónico. En el marco de la Tesis Doctoral “*Sistemas De Aventanamiento Multiacimutales Para Edificios Sustentables En Climas Templados Continentales*”, se han construido dos módulos experimentales en escala 1:1, para el estudio energético de ventanas multiacimutales. Estos prototipos se simularon en Energy Plus, se ajustó el modelo físico con los datos medidos. A partir de los modelos ajustados es posible prever el comportamiento térmico de otros tipos de ventanas Multiacimutales. Se simularon seis tipos de ventanas Multiacimutales para mostrar la ganancia energética de cada una de ellas y se las comparó con la ventana Plana. Es posible advertir que la ventana multiacimutal, con laterales a 90° y 0.60m de proyección, *Caso 3B*, tiene un 23% de ganancia más que el prototipo real con la ventana multiacimutal (*Caso 1A*) y un 34 % más de ganancia solar que el prototipo con la ventana plana.

Palabras Clave: Prototipos a escala, Simulación térmica dinámica, Sistemas pasivos, Ventanas Multiacimutales.

1. INTRODUCCIÓN

La ventana es uno de los sistemas de mayor importancia en la arquitectura, tiene un carácter complejo, cumple múltiples funciones pero básicamente es un dispositivo imprescindible de conexión entre interior y exterior. Se trata de un elemento vital e insustituible de la arquitectura desde el uso del vidrio como material constructivo. Se manifiesta en ella la tensión entre el adentro y el afuera, la vida privada y la escena pública (Le Corbusier, 1926).

En Inglaterra, en el siglo XV, se adopta un tipo de ventana parecido al francés, llamadas Bow Windows o Bay Windows, un espacio cerrado de forma prismática proyectada con paños facetados, que cumplía la función de mirador (Peraza et al. 2000). Estos tipos de ventanas, salientes de la línea de la fachada, poseen mayor cantidad de superficie expuesta al exterior y por lo tanto se maximizan los intercambios de flujos energéticos: permiten el paso de mayor cantidad de luz que las ventanas planas, pero también hacen más dificultosa la protección climática. En el caso de invierno esto consiente mayor ingreso de radiación solar para calefacción, pero también se acentúan las pérdidas nocturnas. Estas características las hacen muy interesantes para ser utilizadas como sistema solar pasivo, con las adecuadas protecciones para cada requerimiento estacionario.

En la ciudad de Mendoza, Argentina, cuyo clima es templado continental con grandes amplitudes térmicas diarias en inviernos fríos y veranos cálidos, también se cuenta con edificaciones que poseen ventanas proyectadas. Actualmente existe una tendencia creciente en la construcción de las mismas, sobre todo en barrios privados. Se han realizado diversos estudios para evaluar el comportamiento térmico-energético de fachadas vidriadas en este tipo de climas (Ganem et. al, 2003 y 2005; Esteves et al, 2003; entre otros), sin embargo las ventanas proyectadas carecen de dicho estudio.

Por este motivo se analizan las posibilidades térmicas de este sistema de ventanas (comúnmente llamadas bow windows), en la ciudad de Mendoza. Se pretende aprovechar la oportunidad que brinda este sistema de aventanamiento, cuya imagen es aceptada por la sociedad moderna actual, para mejorar el comportamiento ambiental energético del medio edilicio existente o nuevo.

¹ Becario Doctoral Tipo II-CONICET

² Investigador Independiente- CONICET

³ Investigadora Asistente- CONICET



Figura 1: algunas viviendas con ventanas multiacimutales en la ciudad de Mendoza.

2. CLIMA DE MENDOZA

La ciudad de Mendoza, ($32^{\circ} 40'$ latitud sur, $68^{\circ} 51'$ longitud oeste y 827 m.s.n.m.), presenta un clima templado continental. La necesidad anual de calefacción en Grados- Día (base 18°C) es de $1384^{\circ}\text{C día/año}$. Las temperaturas varían entre -6°C en Invierno y 37°C en verano, con variaciones diarias de aproximadamente 10 a 20°C . La radiación global promedio anual sobre superficie horizontal en Junio es $9.4 \text{ [MJ/m}^2\text{.día]}$ y en Diciembre $26.10 \text{ [MJ/m}^2\text{.día]}$.

3. PROTOTIPOS EXPERIMENTALES

Se construyeron dos modelos en escala 1:1, con el propósito de ensayar el comportamiento térmico/energético de las ventanas en función de las variables climáticas y la radiación solar. Se estudió: la configuración geométrica, sus dimensiones, el sistema constructivo y el tipo de ventanas a construir. El objetivo es comparar el desempeño de la ventana plana alineada al muro con el de la ventana multiacimutal. Por ese motivo ambos prototipos tienen las mismas características geométricas y constructivas (variables fijas). Sus dimensiones son de 2,50m de largo por 1,50m de ancho y 2,50m de alto.

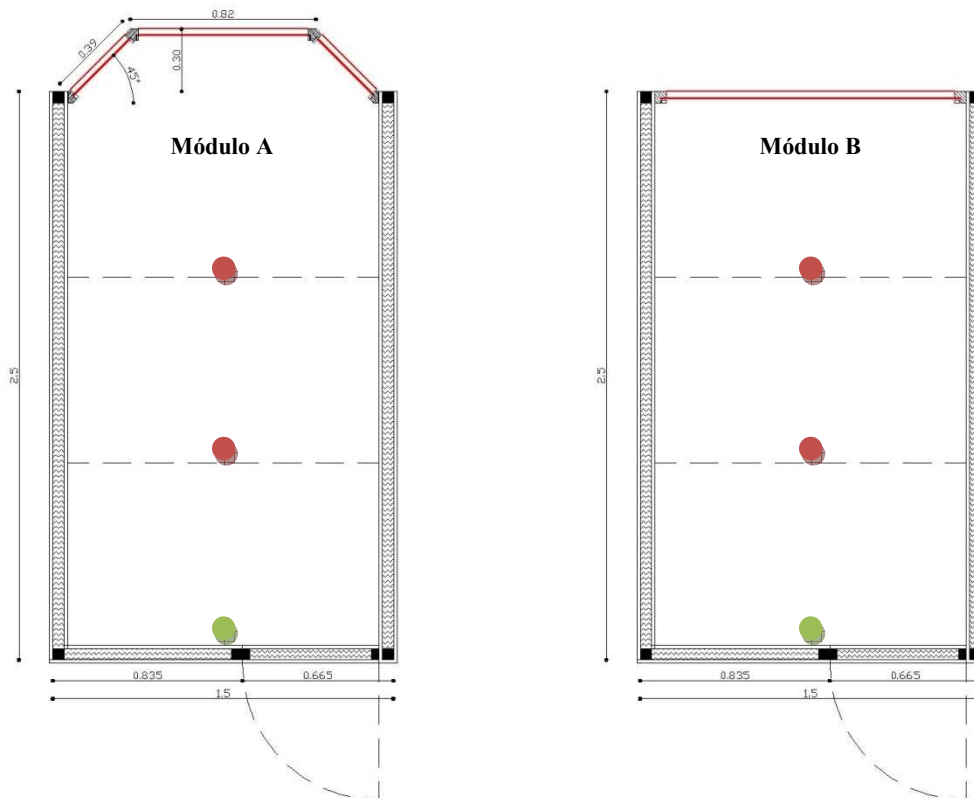


Figura 2: Planta de los dos módulos experimentales. Módulo A: con ventana Multiacimutal y Módulo B: con ventana Plana

Ambos están realizados con cerramientos y estructura metálica liviana. El total de la envolvente expuesta es de 28m^2 para el módulo de la ventana plana y $29,5 \text{ m}^2$ para el módulo de la ventana multiacimutal. Los mismos se materializan de la siguiente forma:

a. Elementos transparentes: Ventana Plana 5,5% del total de envolvente expuesta (28m^2) y 44 % respecto de la fachada. Ventana Multiacimutal 6% del total de envolvente expuesta ($29,5 \text{ m}^2$) y 47,2% respecto de la superficie de la fachada. La Carpintería de madera, vidrio de 3mm. No presenta protección externa. Transmitancia térmica $K = 5,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

b. Elementos opacos puertas: 5,3 % del total de envolvente expuesta. Compuestos por dos placas de cartón prensado unidos a la estructura de caño estructural, y entre ellas, cuatro centímetros de Polietileno Expandido. Transmitancia térmica $K = 2,10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

c. Elementos opacos muros: 62,4 % del total de envolvente expuesta. Compuestos por dos placas de cartón prensado unidos a la estructura de caño estructural, y entre ellas, cuatro centímetros de Polietileno Expandido. Transmitancia térmica $K = 2,10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

d. Elementos opacos techo: 13,4% del total de la envolvente expuesta. Compuestos por dos placas de cartón prensado unidos a la estructura de caño estructural, y entre ellas, cuatro centímetros de Polietileno Expandido, por fuera membrana asfáltica y chapa autoportante galvanizada. Transmitancia térmica $K = 2,10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, y

e. Elementos opacos piso: 13,4% del total de la envolvente expuesta. Compuestos por dos placas de cartón prensado unidos a la estructura de caño estructural, y entre ellas, cuatro centímetros de Polietileno Expandido. Suspendingo a 0,10m del suelo tierra. Transmitancia térmica $K = 2,10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Todas las superficies se pintaron, tanto en el exterior como en el interior, con pintura blanca satinada, para disminuir la absorción en el rango solar.



Figura 3: a) Fotos de los Módulos experimentales. b) Sensores en el espacio interior.

3.1. Instrumentos y Métodos de Medición

Para realizar las mediciones in situ de los prototipos se utilizaron 7 micro-adquisidores de datos HOBO U10 (temperatura y humedad). Uno, localizado en el exterior a la sombra. De los seis restantes se colocaron 3 en cada prototipo: Dos midiendo temperatura de globo negro, uno midiendo temperatura y humedad en el interior de cada prototipo. Los globos negros se colocaron equidistantes entre sí y a 1,50m del piso. El tercer hobo se colocó cercano a la pared a la misma distancia del piso. La posición de los mismos se indica mediante círculos rojos (globos negros) y círculo verde (TBS del aire) en la Figura 2. El período de medición fue de 7 días entre el 09-07-2011 y el 15-07-2011. El intervalo de toma de datos se fijó en 15 minutos. Para el procesamiento de la información se utilizaron los programas “Microsoft Office Excel” y “HOBOWarePro”. Se tomaron datos de radiación solar global sobre plano horizontal con un solarímetro Kipp & Zonen y datos de velocidad y dirección de viento con una estación meteorológica Pegasus.

4. ENERGY-PLUS: Programa para la simulación térmica dinámica de edificios.

Energy-Plus, versión 6.0, -software elegido para simular los prototipos-, es un programa de simulación térmica y energética de edificios desarrollado por DOE (Department of Energy, Estados Unidos), que trabaja en régimen dinámico y permite interrelacionar las prestaciones de los sistemas energéticos con las características de la envolvente del edificio. Se construye sobre las características de códigos BLAST y DOE2. Aunque EnergyPlus es capaz de simular cargas de calefacción, ventilación, iluminación natural y artificial, cargas internas e instalaciones de climatización (HVAC), nos hemos acotado en simular solamente el espacio con las variables exteriores medidas, ya que el objetivo primario del estudio es predecir la influencia de las ventanas en las cargas térmicas de los edificios.

EnergyPlus calcula las cargas térmicas de los edificios por el método de balance de calor. Este método tiene en cuenta todos los balances de calor en las superficies exteriores e interiores y la conducción de calor transitoria en el espacio. Los resultados de la simulación de EnergyPlus han sido validados a través de numerosas pruebas analíticas, comparativas y empíricas. En EnergyPlus, la transferencia de calor por radiación, convección y conducción se calcula en cada paso de tiempo. Los Valores - U no son constantes a través de la simulación, ya que la transferencia de calor por radiación y convección se calcula por medio de algoritmos que toman en cuenta parámetros tales como la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire.

El programa permite al usuario una lista extensa de variables de salida, como, entre otras: temperatura interna de cada zona del edificio, temperatura radiante media, temperatura operativa y temperaturas superficiales interiores y exteriores. Los datos requeridos de entrada son: la caracterización geométrica, las características de sus componentes constructivos y las cargas internas, permitiendo además representar el uso intermitente de cualquier edificio, mediante "Schedules".

4.1. Ingreso De Datos: Geométricos en Open Studio y Constructivos en IDF Editor.

El ingreso de los datos geométricos de los prototipos, se ha realizado por medio Open Studio Plug-in para Google SketchUp, versión 1.0.6.382. Este programa permite crear y editar la geometría del edificio en los archivos de entrada de EnergyPlus.

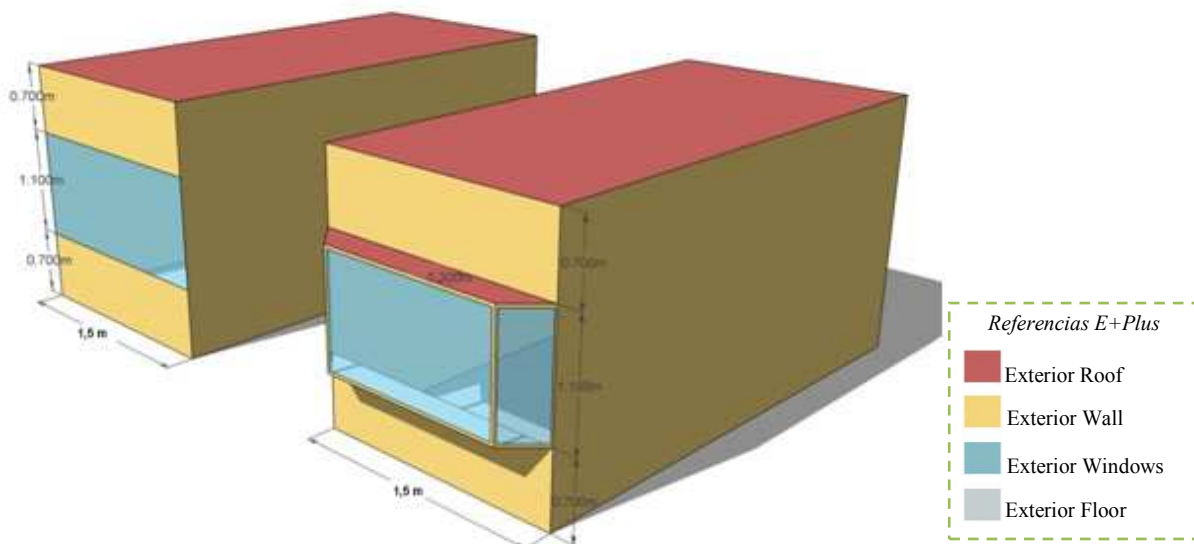


Figura 4: Imagen en Open Studio de los prototipos 1 y 2.

Se dibujaron con las mismas consideraciones geométricas que los prototipos reales. Distanciados 1,50m entre sí, una zona por módulo y orientados al norte verdadero, cada uno con su ventana, plana y multiacimutal.

Para el ingreso de materiales no mäsicos el programa solicita el ingreso de las resistencias, la rugosidad y los coeficientes de absorptancia térmica, solar y visible. En la tabla 1 se muestran los valores de los materiales ingresados y los componentes de cada elemento constructivo.

Tabla1: Cuadro de Conductividades térmicas de los materiales empleados

Capas	Resistencia Térmica	Rugosidad	Absortancia térmica	Absortancia Solar	Absortancia Visible
<i>Layers</i>	<i>Thermal Resistance [m2.°C/W]</i>	<i>Roughness</i>	<i>Thermal Absorptance</i>	<i>Solar Absorptance</i>	<i>Visible Absorptance</i>
Exterior wall					
Chapadur	0.02	MediumSmooth	0.3	0.3	0.3
Polietileno Expandido	0.87	Rough	0.9	0.3	0.3
Chapadur	0.02	MediumSmooth	0.3	0.3	0.3
Exterior Floor					
Chapadur	0.02	MediumSmooth	0.3	0.3	0.3
Polietileno Expandido	0.87	Rough	0.9	0.3	0.3
Chapadur	0.02	MediumSmooth	0.3	0.3	0.3
Exterior Roof					
Chapadur	0.02	MediumSmooth	0.3	0.3	0.3
Polietileno Expandido	0.87	Rough	0.9	0.3	0.3
Chapadur	0.02	MediumSmooth	0.3	0.3	0.3

Las absorptancias se consideraron de acuerdo a bibliografía específica (Yañez, 1982). Para el cálculo de la resistencias del Chapadur se consideró $e=0.004m$ y $\lambda=0.2 [W/mK]$.

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Fórmula 1: Resistencia Térmica

Dónde:

e=Espesor [m].

λ =Conductividad térmica del material [W/mK].

Con respecto al material traslúcido utilizado, se muestran las propiedades en la tabla 2. Es importante aclarar que el programa considera las dos caras del vidrio (front-back) por separado para el cálculo de ganancia solar.

Tabla2: Propiedades ópticas del vidrio utilizado en Exterior Windows

Tipo de Vidrio	Transmitancia Solar	Reflectancia Solar		Transmitancia Visible	Reflectancia Visible		Emisividad Infrarroja	
		Front	Back		Front	Back	Front	Back
<i>Glass Type</i>	<i>Solar transmittance</i>	<i>Solar Reflectance</i>		<i>Visible transmittance</i>	<i>Visible reflectance</i>		<i>IR hemispherical emissivity</i>	
Exterior Windows								
<i>Vidrio de 3mm</i>	0.834	0.075	0.075	0.899	0.083	0.083	0.84	0.84

Los coeficientes convectivos utilizados fueron, para los elementos exteriores, 15 W/m²-C y para los muros interiores 5.6 W/m²-C. Las renovaciones de aire por hora se fijaron en 0,5.

4.2. Ajuste de los Prototipos en Energy-Plus

Con las variables climáticas medidas en el período seleccionado, se conformó el archivo de clima necesario para simular el modelo físico en EnergyPlus. Cabe destacar que se seleccionaron 5 días: 09/07/2011 al 13/07/2011. Los datos mínimos necesarios para realizar el archivo climático son: Radiación Global sobre superficie horizontal, Radiación difusa sobre superficie horizontal, Radiación directa al haz, temperatura de bulbo seco exterior, humedad relativa exterior, velocidad y dirección de viento. La radiación directa al haz y difusa sobre plano horizontal, se calcularon por medio de un módulo de cálculo anexo al SIMEDIF (Flores, et al 2000), ingresando la radiación global sobre superficie horizontal y los datos geográficos del lugar.

Se lanzó, RunPeriod, la simulación una semana antes de la fecha seleccionada. Es importante que el modelo físico entre en régimen antes de la fecha que nos interesa evaluar.

Se hicieron algunos ajustes para que la simulación del modelo resultara satisfactoria: se aumentaron las renovaciones de aire por hora. Se llevaron de 0.5r/h a 1.5r/h. También es importante aclarar que se le tuvo que ingresar al modelo físico, algo de masa térmica, ya que E+Plus, considera que sin masa no es posible simular. Se le colocó, como capa interior al tabique del piso, Exterior Floor, las características del ladrillo pero con muy poco espesor: 0.001m.

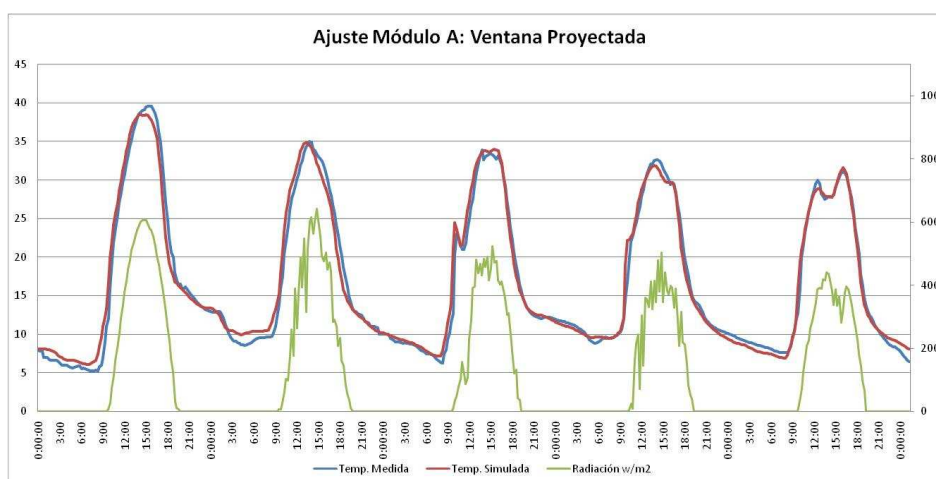


Figura 5: Temperaturas medidas y simuladas del Módulo A.

En la Figura 5 se observa la temperatura interna del módulo A y la temperatura simulada. La diferencia entre ambas curvas es de 2 °C como máximo, diferencia que se considera aceptable a los fines de este trabajo.

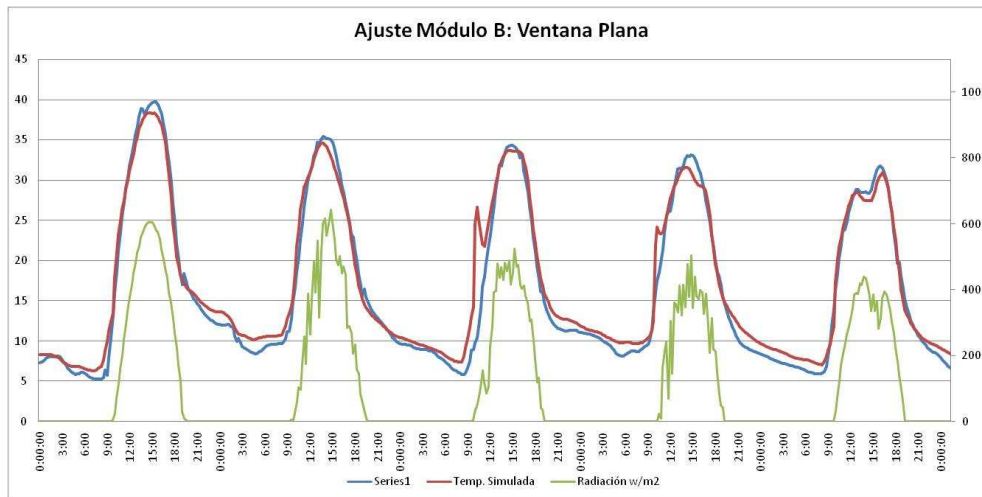


Figura 6: Temperaturas medidas y simuladas del Módulo B.

4.3. Casos a simular con el modelo ajustado

Este modelo ajustado se utilizó para evaluar el comportamiento energético de los siguientes casos:

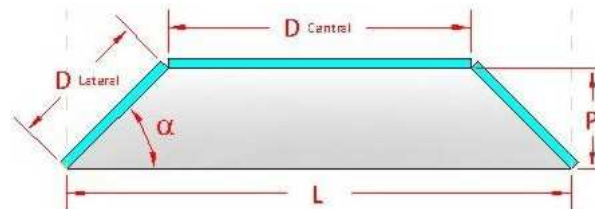


Figura 7: Variables de la Ventana Multiacimutal

Tabla3: Variables de los casos simulados y analizados

Casos	Variable	Se define al variar α :			Constantes	
	α	D[m]			L[m]	P[m]
	Ángulo de Laterales	Lateral 1	Central	Lateral 2	Ancho Vano	Proyección desde muro
Caso 1a (Real)	45°	0.41	0.90	0.41	1.50	0.30
Caso 2a	60°	0.60	0.46	0.60	1.50	0.30
Caso 3a	90°	0.30	1.50	0.30	1.50	0.30
Caso 1b	45°	0.85	0.30	0.85	1.50	0.60
Caso 2b	60°	0.87	0	0.87	1.50	0.60
Caso 3b	90°	0.60	1.50	0.60	1.50	0.60

Los tres primeros casos (Caso1a, Caso2a y Caso3a) tienen como constantes L, el ancho del vano, y P, la proyección de la ventana desde la línea del muro. En los segundos tres casos (Caso1b, Caso2b y Caso3b), la variable P, se llevó a 0.60m. Se puede observar en la Tabla 3, las variables **D central** del caso 2b, es cero. Esto se debe a la conformación geométrica, ya que al variar la proyección, variable P, los laterales se encuentran en un punto, formándose una ventana con dos paños en forma de triángulo.

Se tomaron 6 casos orientados al Norte, se compararon con el caso de la ventana Plana alineada al muro. El Caso1a, corresponde al prototipo real con la ventana multiacimutal.

5. RESULTADOS

5.1. Casos Simulados

Como se describió en el punto 4, el programa permite al usuario una lista extensa de variables de salida. En este caso la que nos interesa analizar es la ganancia de energía a través de ventanas, denominada: Output:Variable:WindowHeatGain. En el valor obtenido están consideradas las pérdidas y la radiación que ingresa por un vidrio y sale por el otro, en los casos de los vidrios laterales de las ventanas multiacimutales, el cálculo es posible gracias a la opción de cálculo: Solar Distribution, Full Interior and Exterior With Reflections.

De las figuras 8 a la 13, se observan los resultados obtenidos. Los datos obtenidos son diarios. La serie de datos de color lila, es la suma de los tres planos que componen la ventana multiacimutal del módulo A. La serie de datos celeste, es el total ganado por ventana plana en módulo B.

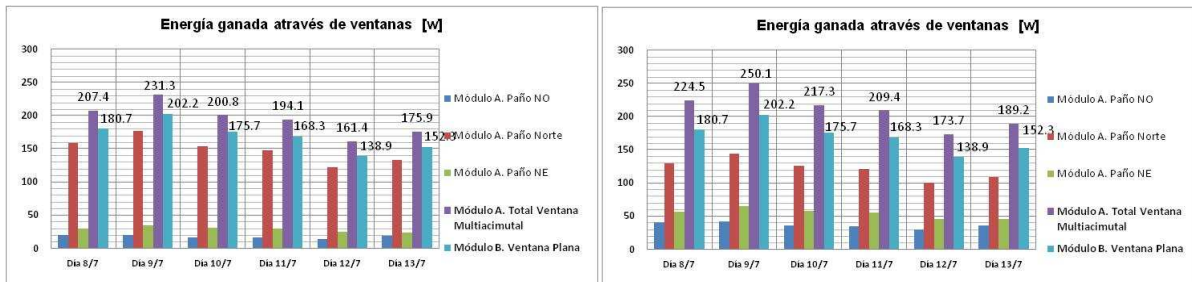


Figura 8 y 9: Resultados de Ganancia de energía de los Casos 1a y 2a

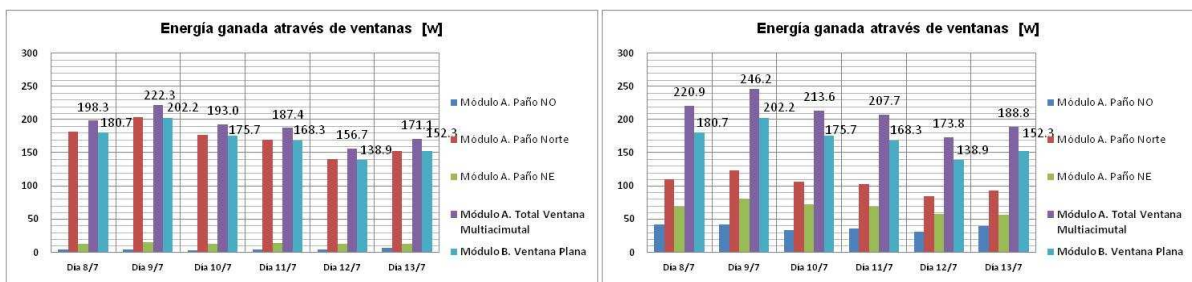
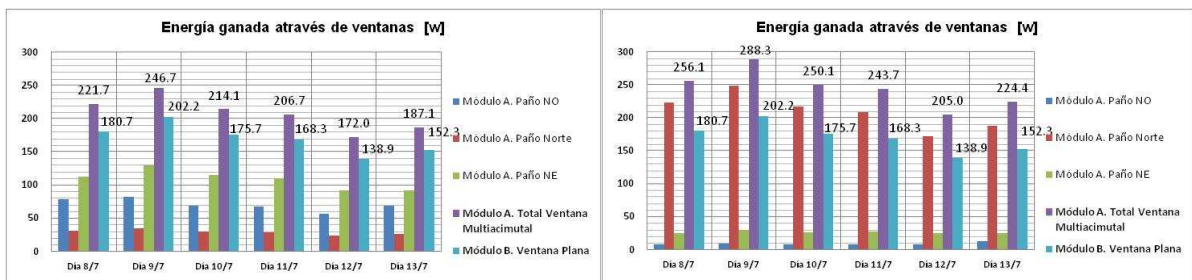


Figura 10 y 11: Resultados de Ganancia de energía de los Casos 3a y 1b



ganancia de energía

Si observamos los resultados obtenidos, se puede afirmar que los paños laterales son los que menos energía colectan. Mientras mayor es el paño central, mayor es la ganancia de energía, previsible ya que se encuentran orientados al norte.

Para comparar todos los casos se seleccionó un solo día soleado, (09/07/2011). Se puede observar que los casos que mayor energía colectan son los casos con los laterales a 90°, Caso 3A y Caso 3B. Esto es previsible, ya que la superficie expuesta al norte es igual a la plana, sumado a los paños laterales, que la ventana plana no posee.

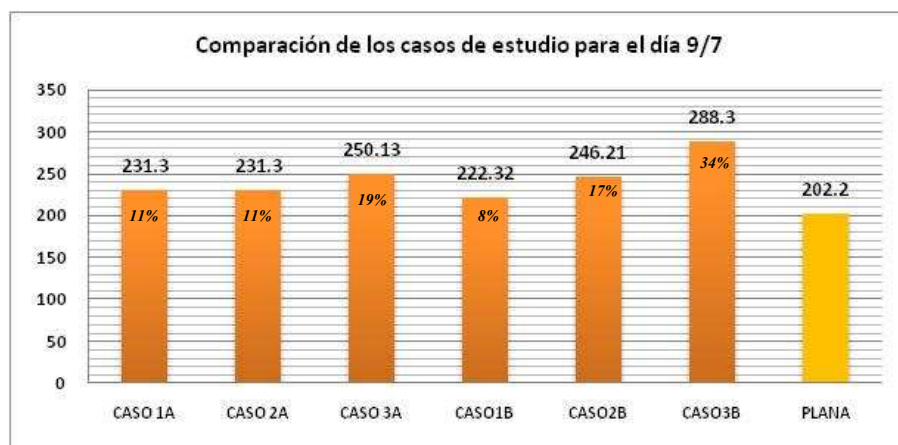


Figura 14: Comparación de ganancia energética de los casos de estudio.

En la figura 14 se muestran los porcentajes diferenciales con respecto a la ventana plana. Nótese que los casos 1A y 2A tienen el mismo porcentaje de ganancia. Se recuerda que el primero tiene sus paños laterales a 45° y el segundo a 60°. Pero si a los mismos casos le aumentamos la proyección desde la línea del muro, casos 1B y 2B, la diferencia entre ambos es del orden del 9%, favorable al caso de los laterales a 60°. El caso que mayor ganancia solar tiene es el caso 3B.

También se puede observar que la ganancia en caso 1B es menor que la del caso 1A, caso real medido. Esto es posible ya que el caso 1B, posee menos superficie al norte (0.33 m²) que la del caso 1A (0.99 m²).

6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos es posible afirmar que las ventanas multiacimutales permiten una serie de ventajas respecto de las planas de igual condición, dado que poseen una expansión importante del espacio. Permiten una conexión visual entre interior y exterior distinta y mucho más “proyectada” desde distintos ángulos del interior.

Es posible advertir que la ventana multiacimutal, con laterales a 90° y 0.60m de proyección, *Caso 3B*, tiene un 23% de ganancia más que el prototipo real con la ventana multiacimutal (*Caso 1A*) y un 34 % más de ganancia solar que el prototipo con la ventana plana.

Se observa que en general las ventanas multiacimutales ganan más energía que sus homólogas planas de igual superficie proyectada vertical. Dentro de las multiacimutales, parecería interesante particularmente las que tienen ventanas laterales NE y NO con un ángulo de 90° respecto del frente N.

Con Energy Plus y las posibilidades que brindan los prototipos experimentales, se realizarán a futuro mediciones en otras orientaciones, que permitan ajustar el programa y determinar la conveniencia de la ubicación de este tipo de aventanamientos en las diversas fachadas que podemos encontrar en la edificación arquitectónica, incluso estudiar las ventanas multiacimutales asimétricas.

Otra ventaja en estudio derivada del uso de ventanas multiacimutales está relacionada con la percepción de confort interior y no sólo con la cantidad de energía ganada, tema del que trata este artículo. La ventana multiacimutal presenta una ganancia de energía más pareja durante todo el día, mientras que en la ventana plana, tiene variaciones con un máximo muy marcado al mediodía solar, y disminuye más rápidamente hacia las horas desplazadas del mediodía solar. El desarrollo de este tema será abordado en futuros trabajos.

REFERENCIAS

- Balcomb J.D., Barley D., McFarland R., Perry J., Wray W., Noll S. 1982. Passive Solar Design Handbook. Vol 1,2 y 3. United States Department of Energy. Estados Unidos de América.
- Department of Energy. (2009) Building Energy software Tools Directory. Disponible en: http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/
- De Fusco, R. 1994. Historia de la Arquitectura Contemporánea. Celeste Ediciones. ISBN: 84-87553-18-4. Madrid, España.
- Ellis, Mark (IEA Chair), 2008. Meeting energy efficient goals: Enhancing compliance, monitoring and evaluation. International Eenergy Agency. Paris, Francia.
- Flores Larsen, Silvana; Lesino, Graciela. 2000. Simedif 2000: nueva versión del programa de diseño y cálculo de edificios. AVERMA. Vol. 4 p.53-58. INENCO – UNSa. Salta, Argentina.
- Ganem, Carolina. 2006. Rehabilitación ambiental de la envolvente de viviendas. El caso de Mendoza. Tesis Doctoral. ETSA Barcelona UPC. España. BRGF (España) N° 1400642779 y N°1400580212 cd-rom y DNDA (Argentina) N° 653867.
- Givoni, B. 1998. Climate considerations in buildings and urban design. Van Nostrand Reinhold. Nueva York, Estados Unidos de América.

Martínez Rey Javier Francisco, Gómez Velasco Eloy. 2006. Eficiencia energética en edificios. Certificación y Auditorías Energéticas. ISBN: 84-9732-419-6 Thomson Editores Spain. España.
Scarduelli F.A., Westphal F.S., Lamberts R. (2009) Aplicacao do Método BESTEST no Energyplus para treinamento em simulacao do desempenho térmico de edificacoes. ENCAC-ENLACAC, pp. 1796-1805.
Yañez G. (1982) Energía Solar. Edificación y clima. España.

ABSTRACT:

The behavior of windows and its implication in energy consumption are a growing concern in today's world, where regulations and awareness of the impact of energy consumption in buildings, promote the adoption of strategies to optimize the architectural design. As part of the doctoral thesis, it does have built two experimental modules in 1:1 scale for the study multiacimutales energy windows. These prototypes were simulated in Energy Plus, the physical model was adjusted with the measured data. From the fitted models can predict the thermal behavior of other types of windows Multiacimutales. Were simulated Multiacimutales six types of windows to show the gain energy each and compared with the flat window. It is possible to notice that the window multiacimutal with 90° lateral projection 0.60m, Case 3B has a 23% gain more than the actual window prototype multiacimutal (Case 1A) and 34% more solar gain than the prototype with the flat window.

Key Word: Prototype to scale, Dynamic thermal simulation, Passive system, Windows.