

REDUCCIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO DEBIDO A CLIMATIZACIÓN EN UN SALÓN DE UN EDIFICIO EDUCATIVO DEL NEA

H. Zurlo, L. Lezcano y G. Figueredo

Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas (GITEA)
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Resistencia
French 414 – 3500 Resistencia – Tel: 0362 4432683 – hzurlo@gmail.com

Recibido 13/08/16, aceptado 09/10/16

RESUMEN: La sociedad actual demanda condiciones de confort que permitan desarrollar actividades con elevada productividad, en el NEA alcanzar las condiciones apropiadas de temperatura y humedad en edificios antiguos implica un excesivo consumo de energía eléctrica. Se presenta la simulación computacional mediante el software *Energy Plus* del comportamiento térmico de un aula del edificio de la Facultad Regional Resistencia de la Universidad Tecnológica Nacional. Se validan los resultados de la simulación con datos experimentales de temperatura interior para idénticas condiciones exteriores de radiación solar y temperatura. Se obtiene la carga térmica instantánea y la disminución potencial de consumo de energía eléctrica destinada a la climatización para diferentes casos de rehabilitación térmica del salón. Se verifica la exactitud del modelo confrontando los resultados de la simulación con los datos internos medidos en el aula. Se demuestra también la capacidad del software como herramienta para mejorar la eficiencia energética de edificios y garantizar las condiciones de confort.

Palabras clave: Ahorro eléctrico, Energy Plus, Simulación térmica, Edificio educativo

INTRODUCCIÓN

Los edificios educativos del Nordeste Argentino (NEA) presentan características propias como ser alta densidad de ocupación, bajo presupuesto destinado a mantenimiento y funcionamiento, clima extremo durante el prolongado período estival típico de la región, alto interés social, etc. que representan exigencias particulares en cuanto al confort térmico (Juan *et al.*, 2014); a esto se le agrega que entre los criterios de diseño, normalmente no estuvo presente el aspecto energético. Antes bien la tipología de estos edificios ha seguido modelos uniformes que se han multiplicado a lo largo y ancho del país sin compadecerse adecuadamente de las diversas condiciones climáticas imperantes. Sus características constructivas han ido evolucionando en busca de una mayor utilización de los espacios con menores costos de construcción, pasando de aulas amplias con cubiertas elevadas y muros masivos, aberturas artesanales de madera y galerías generosas (Maristany *et al.*, 2009) a edificios con aulas compactas de baja altura, cubiertas y envolventes livianas, aberturas metálicas semiindustrializadas, donde se prioriza la economía de materiales con resultados adversos respecto de las condiciones de confort.

La región NEA se inserta completamente dentro de la Clasificación Bio Ambiental caracterizada por la Norma IRAM 11603 como Zona I: Muy Cálida, con temperaturas máximas superiores a 34°C y valores medios superiores a 26°C; con humedad relativa alta y períodos invernales poco significativos. Teniendo en cuenta el Diagrama Bioclimático de Givoni (1969), para alcanzar las condiciones de confort es inevitable recurrir al acondicionamiento (ventilación, deshumidificación y refrigeración) mecánico del aire. De hecho, en las últimas décadas se observa la incorporación de equipos de acondicionamiento termomecánico del aire en la mayoría de los establecimientos educativos de la región incrementando significativamente el consumo eléctrico de las instituciones. Solo en la Provincia del Chaco se contabilizan más de dos mil establecimientos educativos (DINIECE, 2014).

- Aula 2.5: colindante con el aula 2.6: Con 72 m², y una altura de 3,5m.
- También se considerará parte del pasillo que es lindante con el aula 2.6.

2. Datos constructivos

Se detallarán a continuación los aspectos constructivos de la edificación y los materiales que la componen.

Paredes exteriores

De ladrillo macizo de 0,3m de espesor, con revoque interior y exterior.

Nombre	Mortero de cemento o cal para albañilería y revoque/enlucido 1600<d<1800	Muro ladrillo macizo e=0,25m
Rugosidad	Rugoso	Muy Rugoso
Espesor (m)	0,02	0,25
Conductividad (W/m.K)	1	1
Densidad (kg/m ³)	1525	2170
Calor específico (J/kg.K)	1000	1000

Tabla 1: Materiales constructivos de las paredes exteriores (Fuente: ASHRAE 2005)

Paredes interiores

De ladrillo macizo de 0,15m de espesor, con revoque interior y exterior.

Nombre	Mortero de cemento o cal para albañilería y revoque/enlucido 1600<d<1800	Muro ladrillo macizo e=0,12m
Rugosidad	Rugoso	Muy Rugoso
Espesor (m)	0,02	0,12
Conductividad (W/m.K)	1	1
Densidad (kg/m ³)	1525	2170
Calor específico (J/kg.K)	1000	1000

Tabla 2: Materiales constructivos de las paredes interiores (Fuente: ASHRAE 2005)

Piso

El piso está constituido por una losa de hormigón armado de 0,10m de espesor, y un solado de mosaicos de granito reconstituido asentados con una capa de 0,02m de mortero de albañilería.

Nombre	Hormigón armado e=0,1 m	Mortero de cemento o cal para albañilería y revoque/enlucido 1600<d<1800	Mosaico granítico 30x30 cm
Rugosidad	Rugoso	Rugoso	Rugosidad Media
Espesor (m)	0,1	0,02	0,025
Conductividad (W/m.K)	2	1	3
Densidad (kg/m ³)	2400	1525	2750
Calor específico (J/kg.K)	1000	1000	837

Tabla 3: Materiales constructivos de los pisos (Fuente: ASHRAE 2005)

Techo

La cubierta del techo es de chapa galvanizada, el cielo raso es de machimbres, y entre estas dos capas tiene una cámara de aire de aproximadamente 0,5m de espesor medio. Posee aislación térmica e hidráulica.

Nombre	Machimbres 1/2"	chapa ondulada galvanizada	000 F05 Ceiling air space resistance
Rugosidad	Rugosidad Media	Lisa	-
Espesor (m)	0,0127	0,008	-
Conductividad (W/m.K)	0,13	45,3	-
Densidad (kg/m ³)	840	7820	-
Calor específico (J/kg.K)	1381	500	-
Resistencia térmica (m ² .K/W)	-	-	0,18

Tabla 4: Materiales constructivos del techo (Fuente: ASHRAE 2005)

Cerramientos

Las ventanas, con marco de chapa plegada, poseen vidrio común de 4mm de espesor. Las puertas son de madera laminada de 0,04m de espesor. Las aberturas no poseen aislación térmica.

Nombre	Madera	Vidrio
Rugosidad	Media	-
Espesor (m)	0,04	0,004
Conductividad (W/m.K)	0,29	0,9
Densidad (kg/m ³)	900	-
Calor específico (J/kg.K)	1600	-
Resistencia térmica (m ² .K/W)	-	-

Tabla 5: Materiales constructivos de las ventanas y puertas (Fuente: ASHRAE 2005)

Parasoles

Si bien no son parasoles propiamente dichos, la fachada del edificio tiene unas salientes de 0,5m que contornean las ventanas, y que ofrecen algún grado de protección contra el Sol. A los efectos entonces, se tienen en cuenta en el modelo.

Equipamiento

El equipamiento eléctrico interno del salón consiste en nueve artefactos de iluminación que albergan dos tubos fluorescentes de 40W cada uno, cuatro ventiladores de techo de 90W, un proyector multimedia de 350W y un ordenador portátil de 150W.

Utilización

El aula se utiliza regularmente entre los meses de marzo y diciembre, en el horario de 8:00 a 12:00 y de 16:00 a 21:00 hs. Si bien tiene una capacidad superior, su ocupación promedio ronda las 30 personas considerando en función de la actividad que desarrollan un aporte de 150W por persona.

3. Monitoreo experimental

Se relevaron datos de temperatura interior, humedad interior, temperatura exterior, humedad exterior, punto de condensación y presión atmosférica utilizando la estación meteorológica *WS-2812-IT Professional Weather Station* y el software de control y adquisición *HeavyWeather Pro WS 2800 de La Crosse Technology®*.

4. Herramientas Sketchup, OpenStudio y Energy Plus

Para la simulación del comportamiento térmico del aula se utilizó el software Energy Plus desarrollado por el Departamento de Energía de los EEUU. Dicho programa informático utiliza un archivo de datos climáticos para un año meteorológico típico; en el presente caso se utilizaron los datos climáticos correspondientes a la toma de datos hecha in situ generando el archivo necesario. Además se debieron codificar las dimensiones y características térmicas de los materiales de construcción utilizados, las potencias y perfiles horarios de los equipos que contribuyen a la carga térmica y la cantidad, nivel de actividad y perfil horario de las personas que utilizan el aula a simular.

A fin de modelizar virtualmente el aula con todas sus características constructivas se utilizaron los programas *SketchUp Make* y *OpenStudio*. Una vez obtenidos los datos referidos a materiales, medidas y demás información acerca del objeto de estudio, se procedió a realizar el modelado en 3D del aula y sus zonas lindantes. A continuación, una breve introducción a estos tres programas.

Energy Plus: Es un programa de simulación del desempeño energético de edificios. Se utiliza para modelar tanto el consumo de energía (para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación, tomas para fuerza motriz y otras cargas) como el consumo de agua en los edificios. Trabaja de fondo como motor de cálculo, además de constituir un recurso para modelizaciones más complejas. La versión que se utilizó para la simulación es la V8.4.0 para Windows de 64 bits, año 2015.

SketchUp Make: Es un programa de diseño gráfico y modelado en 3D que se puede utilizar (entre otros) en aplicaciones para proyectos de arquitectura. Su característica destacable es que los diseños se

pueden realizar de manera extremadamente sencilla, con lo cual se utilizó como base “geométrica” con unas pequeñas variaciones con respecto al uso común. Sirve de interface al Energy Plus ya que éste por sí solo es poco amigable a la hora de modelar. La versión que se utilizó para la simulación es la V16.0.19912 para Windows de 64 bits, año 2015.

Open Studio: Es una colección de herramientas multiplataforma (Windows, Mac, y Linux) de software para apoyar el modelado del flujo de energía del edificio usando Energy Plus y el análisis avanzado utilizando la radiación. Es un recurso de código abierto. Hace que sea fácil crear y editar la geometría de la construcción en los archivos de entrada de Energy Plus. También permite hacer simulaciones de Energy Plus y ver los resultados sin salir del programa de dibujo de SketchUp Make. La versión que se utilizó para la simulación es la V 1.10.0 para Windows de 64 bits, año 2015.

5. Metodología de la simulación

Para realizar la simulación de manera correcta, se deben tener en cuenta dos factores importantes, por un lado el fichero creado por el usuario con ayuda de las herramientas antedichas con lo que se genera un archivo de extensión .osm, y por el otro el fichero climático. Este fichero (Energy Plus weather data .epw) define las condiciones climáticas externas durante la simulación. Cada localidad o zona tiene un archivo que describe la temperatura externa, radiación solar, y otras condiciones atmosféricas. Ofrecen datos “típicos” derivados de observaciones a cada hora durante muchos años en esa región, en una localización específica y son tomados por la oficina del Servicio Meteorológico. En el caso particular de Resistencia, no se tienen disponibles dichos datos, de manera que se elaboró un fichero conteniendo los datos meteorológicos medidos en Resistencia, para el periodo analizado.

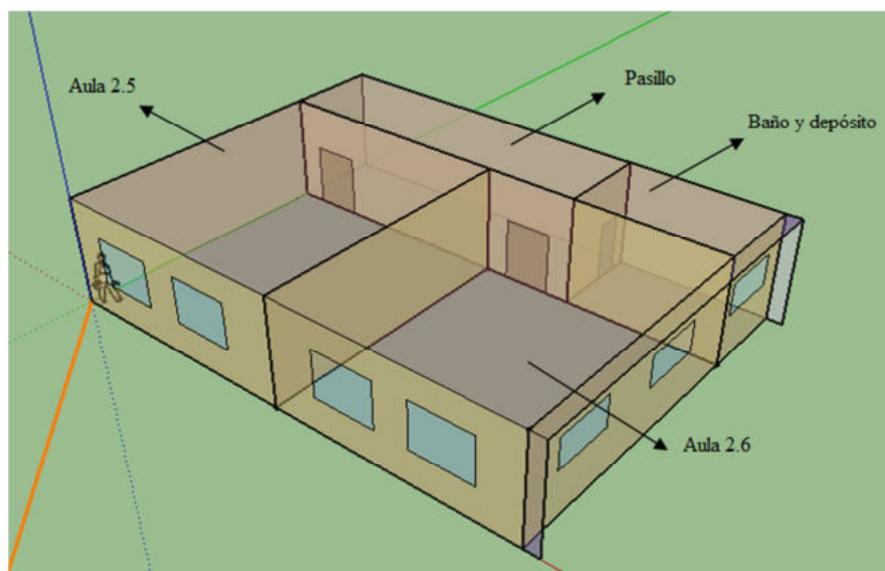


Fig. 2: Modelado con SketchUp Make 3D de las aulas, el pasillo y el baño con el depósito

Se utilizó el programa Open Studio para definir los materiales, construcciones y sets constructivos, parasoles y luego se procedió a realizar con el programa SketchUp Make en modelado en 3D, en la Figura 2 se puede ver el esquema completo. La Figura 3 representa el mismo modelo pero con renderizado por tipo de superficie.

Una vez elaborado el modelo se le asignaron los sets constructivos, dependiendo del uso del local se crearon las zona térmicas y se definieron las variables de salida que se quiere analizar luego de la simulación.

Se efectuó la simulación térmica del salón de clases con climatización mediante un equipo de compresión mecánica de vapor, en cuatro escenarios diferentes, que van incorporando mejoras tendientes a reducir el consumo de energía eléctrica en el acondicionamiento del aire.

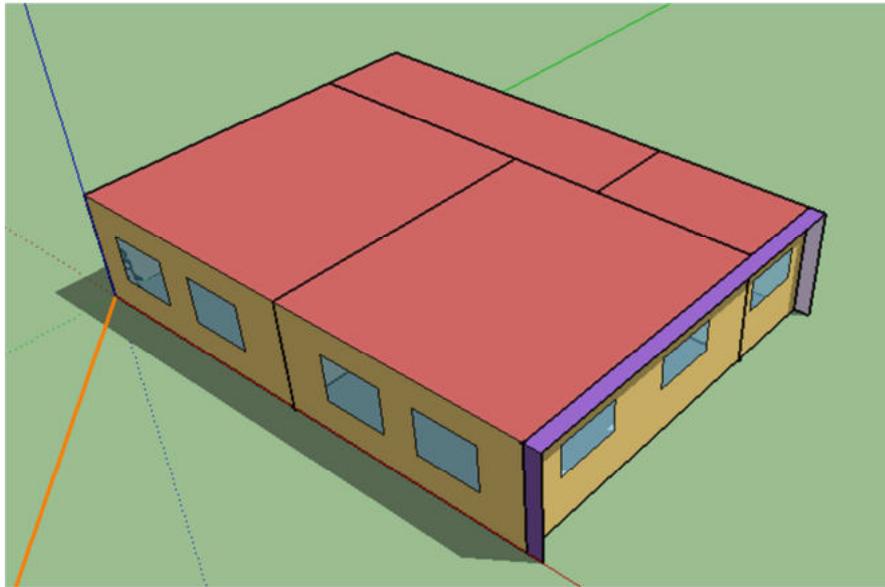


Fig. 3: Modelo renderizado por tipo de superficie

El sistema de aire acondicionado incorporado a todas las simulaciones tiene una potencia frigorífica nominal de 20kW, un COP de 3 en condiciones nominales, caudal nominal de aire interior de $1\text{m}^3/\text{s}$ y factor de calor sensible nominal de 0,6.

Para el ajuste del modelo, se contrastaron los datos de temperatura simulados contra los medidos para un período excepcional durante el cual el aula no se utilizó midiéndose la temperatura y humedad relativa del interior de la misma, considerando una infiltración equivalente a dos renovaciones por hora y cargas térmicas nulas por personas y equipos. Para compensar el hecho de que solo se modelizó un sector del edificio se incorporó una masa térmica equivalente a las paredes colindantes, por lo anterior se asume que el modelo predice adecuadamente el comportamiento del salón bajo diferentes condiciones.

Escenario 1 (E1): El punto de partida del análisis consiste en la situación actual del aula, sin la introducción de ningún tipo de mejoras constructivas, con un nivel de ocupación medio de 30 personas y considerando las cargas externas e internas mencionadas precedentemente y se incorpora la ventilación requerida según el número de ocupantes promedio y la actividad que se realiza, equivalente a 8 renovaciones por hora, en forma permanente incluyendo las infiltraciones (ASHRAE, 2004). La temperatura de diseño interior se estableció en 25°C , consignando esta temperatura en el control del sistema de acondicionamiento.

A continuación se introdujeron mejoras secuenciales tendientes a mejorar el confort térmico de los ocupantes y a reducir el consumo de energía eléctrica; las modificaciones incorporadas se resumen en los escenarios que se detallan a continuación.

Escenario 2 (E2): se considera todo lo anterior mejorando, además, la aislación térmica de la cubierta mediante el agregado de una capa de lana de vidrio de 0,05m de espesor.

Escenario 3 (E3): a lo especificado en el escenario anterior se le agrega la presencia de parasoles exteriores en las ventanas, los cuales ofrecen protección contra la radiación solar directa para ángulos de elevación superiores a $33,7^{\circ}$ en un plano normal al de la abertura.

Escenario 4 (E4): contempla la totalidad de las mejoras anteriores pero incrementando, por último, levemente, la temperatura de consigna del aire acondicionado pasando de los 25°C iniciales a un nuevo valor fijado en 26°C .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el estudio se seleccionó el tiempo comprendido entre el 23 de noviembre y el 29 de diciembre de 2015 por tratarse de un período del año lectivo con altas demandas energéticas destinadas a refrigeración. Para mayor claridad se muestran gráficos con los resultados obtenidos para una semana, si bien la demanda de energía destinada a refrigeración y ventilación del salón se calculan para todo el período bajo análisis. En todos los gráficos se seleccionó la misma escala de temperaturas, de tiempo y de potencia frigorífica para facilitar la comparación de los mismos.

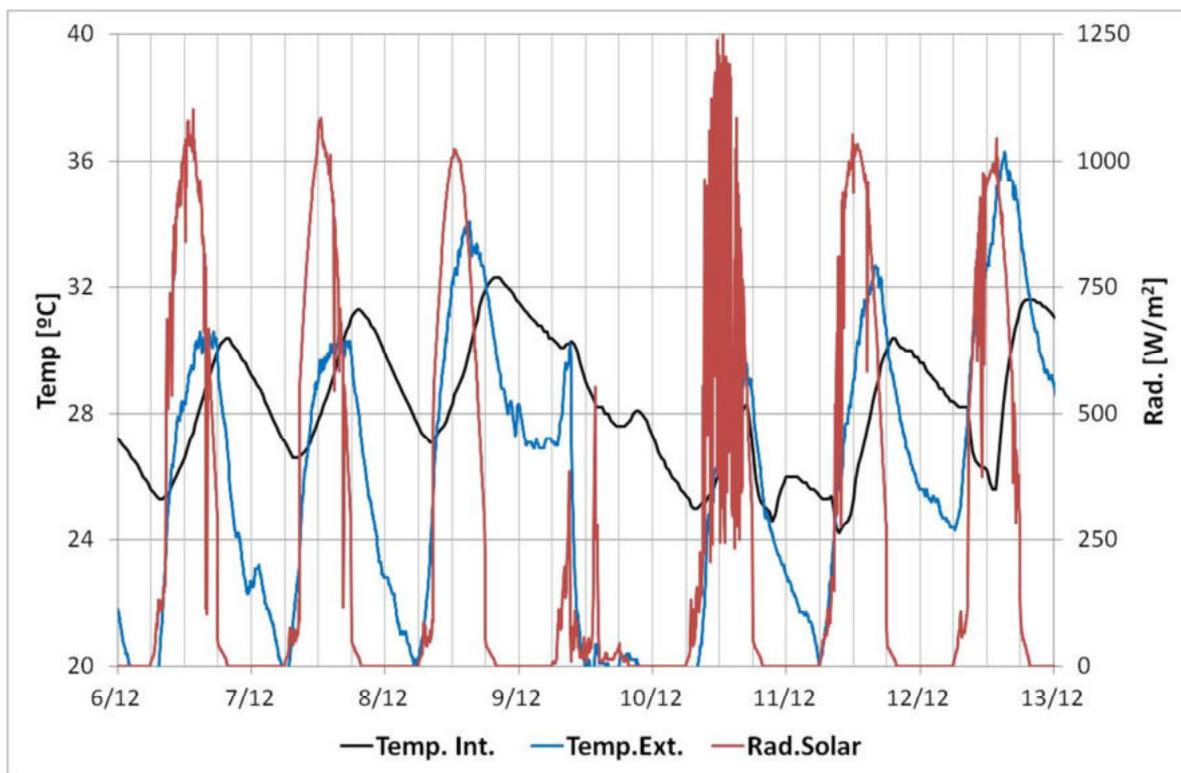


Fig. 4: Aula en situación original, parámetros medidos

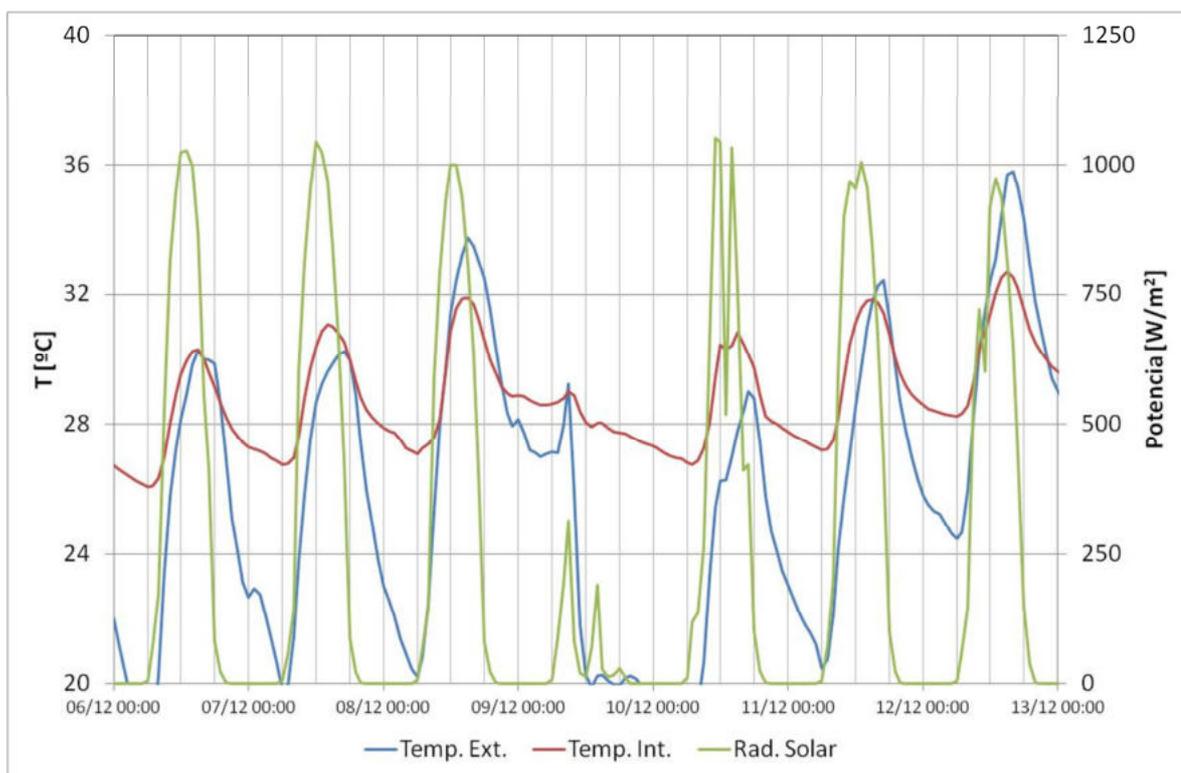


Fig. 5: Aula en situación original, parámetros simulados

Se verifica la validez del modelo de simulación comparando los parámetros medidos con los obtenidos de la simulación. Se comprueba una adecuada correlación entre las temperaturas interiores del aula medidas y simuladas. Los resultados de esta comparación se observan en las figuras 4 y 5, la primera muestra los valores medidos mientras la segunda los obtenidos por simulación para un mismo período de una semana de duración.

A partir de ésta verificación es factible asumir que los resultados obtenidos con la incorporación de modificaciones en el modelo de simulación, serán los esperables en el caso de efectuar las mismas modificaciones en la realidad.

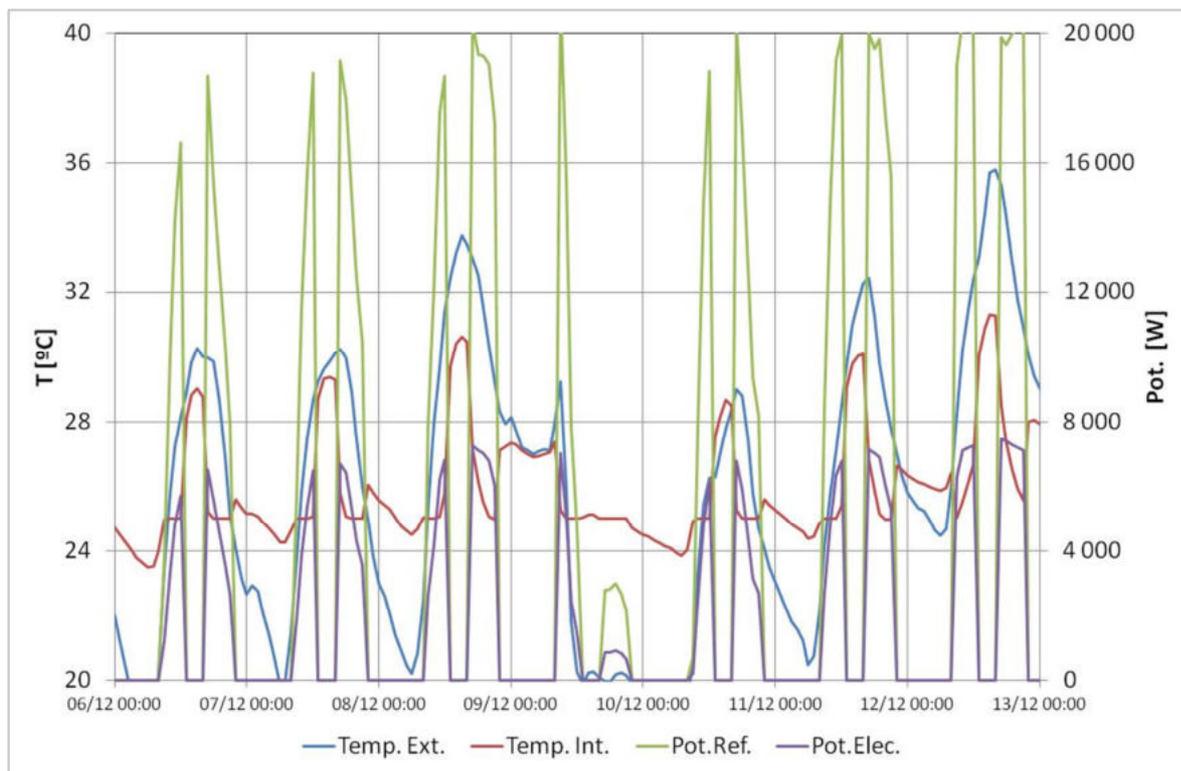


Fig. 6: parámetros simulados para el Escenario 1: aula con equipo 20kW, ventilación y cargas internas.

En la Figura 6 se representaron las temperaturas interior y exterior y las potencias de refrigeración y de electricidad para el caso del escenario E1 compuesto por el aula en condición original con ocupantes, considerando la ventilación adecuada y el sistema de aire acondicionado funcionando a una temperatura de consigna de 25°C.

La Figura 7 muestra el comportamiento de los mismos parámetros mejorando la aislación térmica de la cubierta mediante el agregado de una capa de lana de vidrio de 0,05m de espesor y manteniendo las demás condiciones.

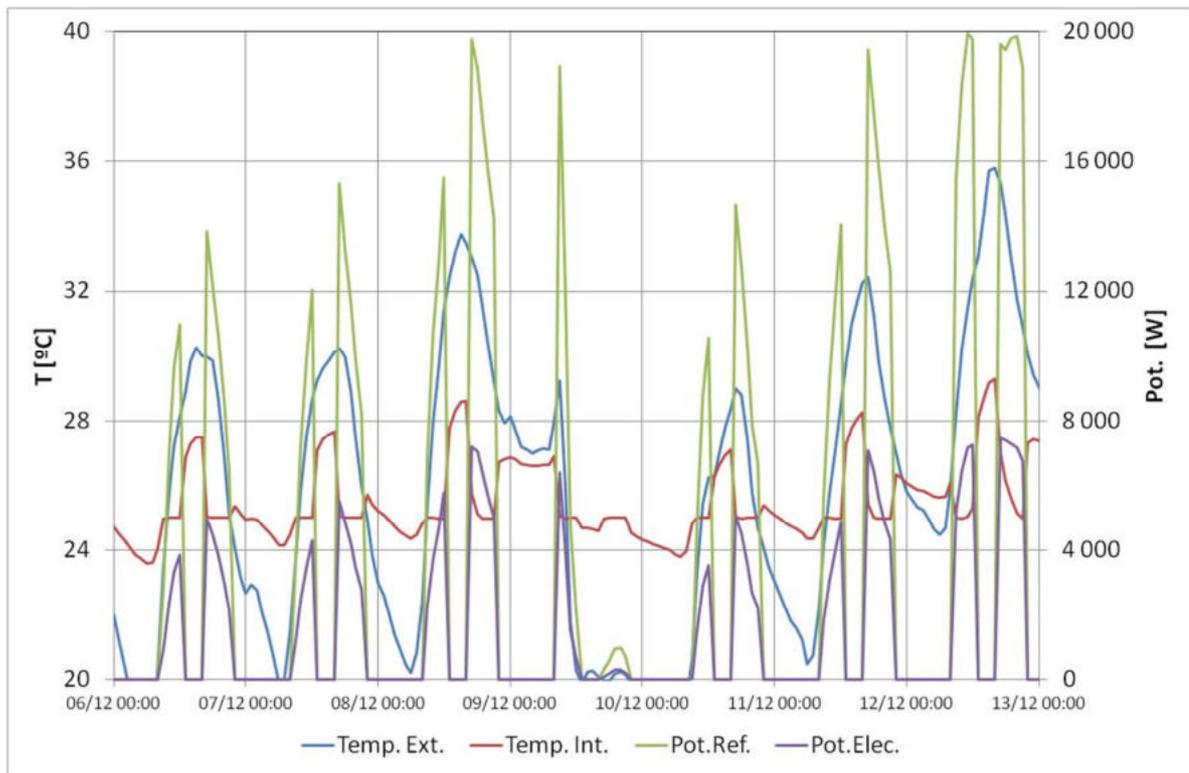


Fig. 7: Parámetros para el Escenario 2: aula con equipo 20kW, ventilación, cargas internas y aislación térmica

La Figura 8 reproduce la evolución de los mismos parámetros agregando al edificio parasoles exteriores en ambas caras expuestas directamente al sol, como se ha indicado para el Escenario 3.

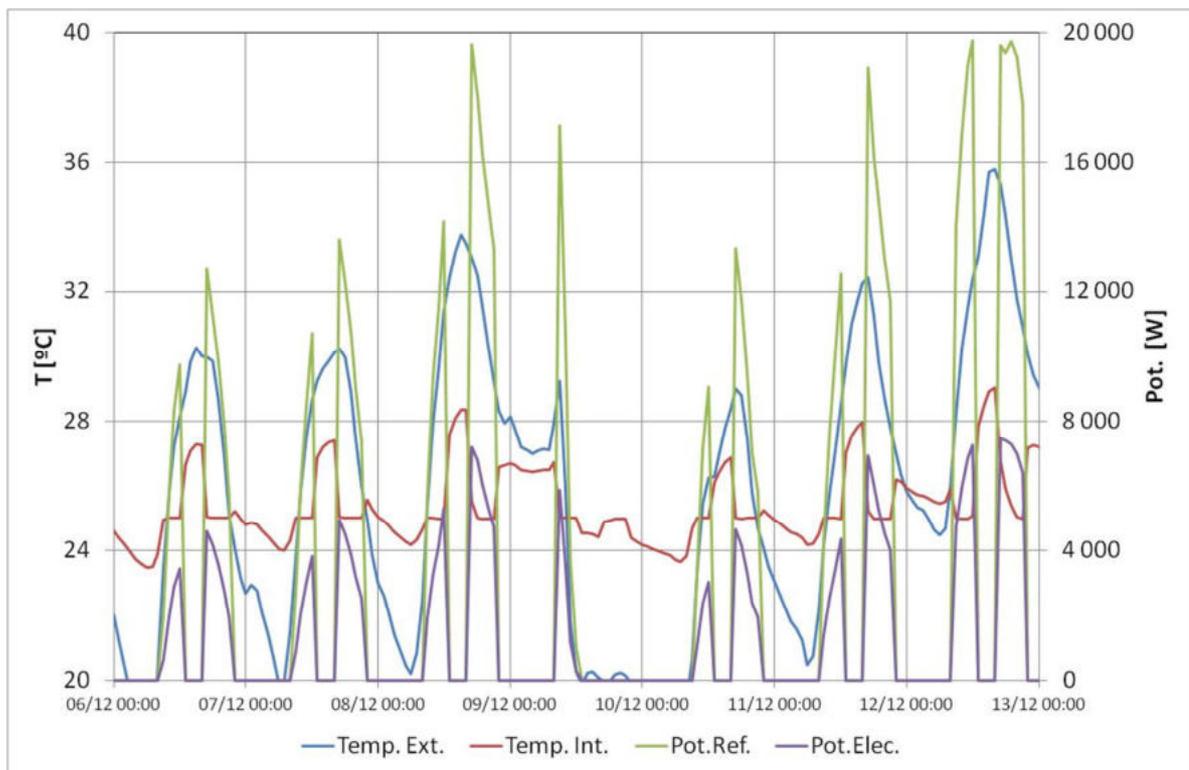


Fig. 8: Escenario 3: Aula con equipo 20kW, ventilación, cargas internas, aislación térmica y parasoles.

Las temperaturas exteriores máximas para el periodo expuesto se encuentran entre los 30°C y los 36°C; mientras que la potencia de refrigeración, durante la tarde, alcanza picos de 20kW y el consumo

eléctrico se acerca a máximos de 9kW. Durante la tarde del día 12/12, cuando la temperatura exterior se acercó a los 36°C, el sistema de refrigeración no alcanzó a satisfacer la demanda de frío provocando que la temperatura interior descienda lentamente sin alcanzar la consigna de 25°C.

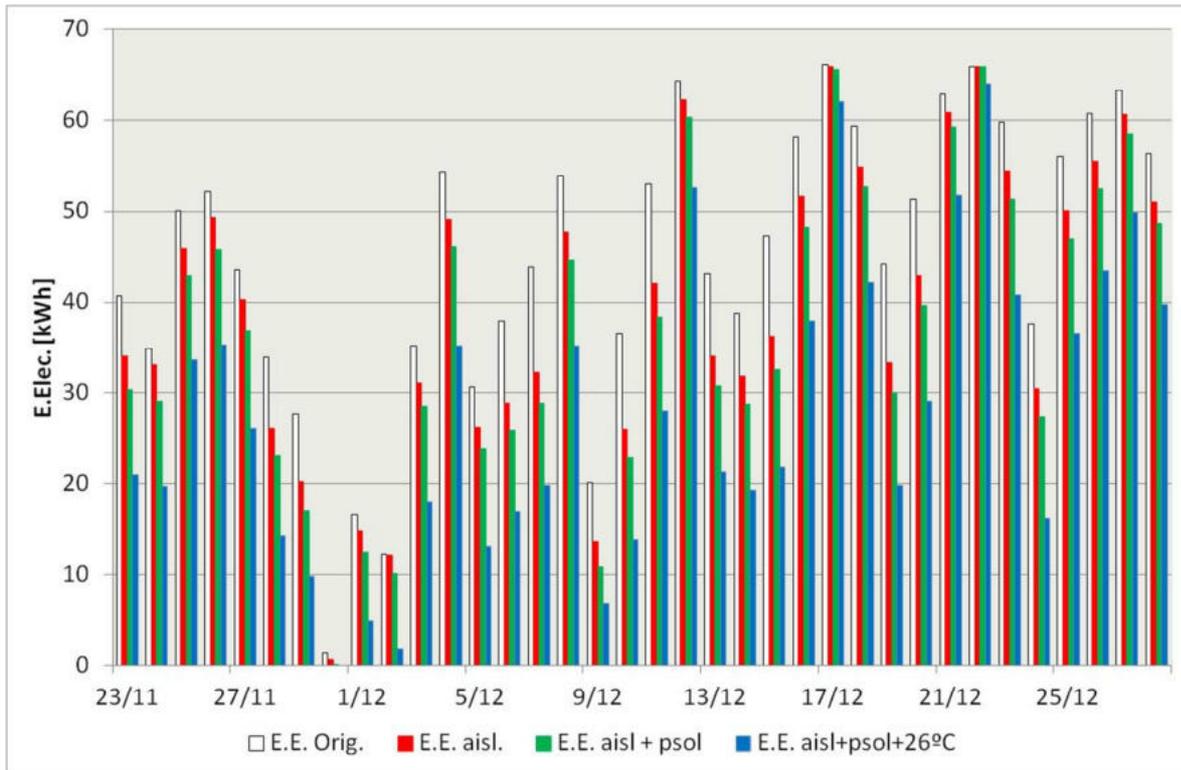


Fig. 9: Consumo diario de energía eléctrica para el acondicionamiento del aire en los diferentes escenarios.

Reuniendo los gráficos de la demanda de energía eléctrica requerida para el acondicionamiento del local para los diferentes escenarios, como se muestra en la figura 9, se ponderan las disminuciones de consumo obtenidas en cada caso.

Sin embargo se observa que hay días en los que no se aprecian diferencias significativas en el consumo a pesar de las mejoras especificadas para los distintos escenarios; es el caso de los días 17 y 23 de diciembre que ameritan un análisis detallado.

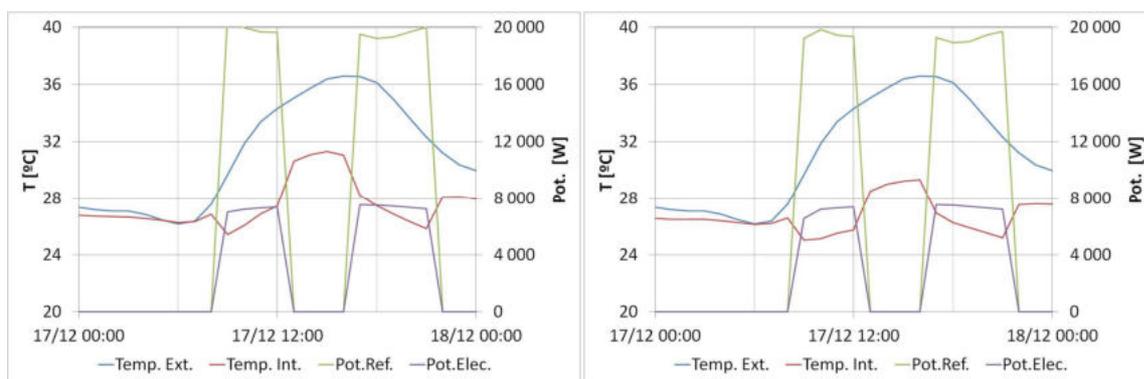


Fig. 10: Comportamiento de los parámetros en estudio durante el día 17/12 para el Escenario 1 (Izqda.) y para el Escenario 4 (Dcha)

Efectuando un análisis detallado del día 17/12 durante el cual ni aún con las modificaciones se alcanza la consigna de temperatura interior, se aprecia entonces que no hay reducción de consumo porque el equipo opera permanentemente al 100% de su capacidad en los tres primeros escenarios y recién con la modificación de la consigna se logra una pequeña reducción de consumo. En definitiva, con la

rehabilitación se logra mejorar las condiciones interiores y el confort pero no se reduce el consumo de energía.

En síntesis, el consumo de energía eléctrica destinada a climatización del aula para cada uno de los escenarios puede apreciarse en la Tabla 6, observándose una sucesiva disminución en el consumo previsto a medida que se van incorporando mejoras en la envolvente del aula. Cabe destacar la disminución significativa en el consumo como consecuencia de incrementar levemente la temperatura de Consigna del equipo de acondicionamiento (Escenario 4).

Caso	Demanda de Energía Eléctrica del período		
	[kWh]	[%] s/Escen1	[%] s/Escen3
Escenario 1	1614	100%	-
Escenario 2	1415	88%	-
Escenario 3	1317	82%	100%
Escenario 4	1002	62%	76%

Tabla 6: Energía Eléctrica destinada a climatización durante el período de estudio para cada escenario

CONCLUSIONES

Es posible cuantificar el ahorro de energía obtenido con cada mejora propuesta y determinar el impacto de cada modificación sobre la situación actual. La mejora en la aislación de la cubierta produce un ahorro del orden del 12% en la energía demandada para la refrigeración del local. Con el agregado de parasoles, el ahorro llega al 18% respecto de la situación de arranque (Escenario 1).

Se constata, además, que durante algunos días muy cálidos las modificaciones propuestas no producen una reducción significativa en el consumo eléctrico pero se logra una mejora en las condiciones de confort interior, siempre que el dimensionamiento del sistema de climatización sea el correcto, pues en el caso que esté subdimensionado tampoco se alcanzan las condiciones de confort.

Una reducción muy significativa se obtiene incrementando la temperatura de consigna del aire acondicionado, aumentando desde 25°C a 26°C la temperatura interior se traduce en un ahorro de aproximadamente el 24% en el consumo de energía eléctrica destinada a climatización.

La utilización de herramientas de simulación del comportamiento energético de los edificios constituye cada vez más una necesidad para el profesional de la construcción que quiera garantizar resultados tanto técnicos como económicos. No obstante ello, lo laborioso de su aplicación hacen necesarios esfuerzos adicionales para familiarizarse con su uso y evitar errores que anularían su utilidad.

REFERENCIAS

- ASHRAE STANDARD. (2004). "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality". ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004. Atlanta.
- Crawley, Drury B.; Lawrie, Linda K.; Winkelmann, Frederick C.; Buhl, W. F.;Huang, Y. Joe; Pedersen, Curtis O.; Strand, Richard K.; Liesen, Richard J.; Fisher, Daniel E.; Witte, Michael J.; Grazer, Jason. (2001); "EnergyPlus: creating a new-generation Building Energy simulation program". Energy and Buildings 33 pags 319-331.London.
- DiNIECE Dirección Nacional de Información y Estadística de la Calidad Educativa. (2014) Anuario Estadístico Educativo. Ministerio de Educación y Deportes. Presidencia de la Nación. <http://portales.educacion.gov.ar/diniece/2014/05/24/anuarios-estadisticos/>.
- Flores Larsen, Silvana; Filippín, Celina; Lesino, Graciela. (2010). "La incidencia de los usuarios en el comportamiento térmico de verano de una vivienda en el noroeste argentino". *IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES)*. Cusco, Perú.
- Givoni, Baruch. (1969). Man, Climate and Architecture. 1st Edition. Elsevier. Amsterdam.

- IRAM Instituto Argentino de Normalización. Norma 11603. (1996) “Acondicionamiento Térmico de Edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina”.
- Juan, Branco; Godoy, Paula; Vargas, Orlando; Zurlo, Hugo. (2014) “Incidencia del Sombreado Exterior y de la Calidad de las Aberturas en el Comportamiento Térmico de Verano en un Salón Educativo en el NEA”. III Jornadas de Investigación en Ingeniería del NEA y Países Limítrofes. Resistencia, Argentina.
- Maristany, Arturo; Abadía, Leandra; Angiolini, Silvina; Pacharoni, Ana y Pardina, Matías. (2009). “Comportamiento Higrotérmico de aulas de dos períodos históricos del Colegio Nacional de Monserrat en Córdoba”. ASADES. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 13. Río Cuarto, Argentina.
- Ruberto, Alejandro R. y Depettris, Carlos A. (2013). Estación Meteorológica de Capacitación. Depto. de Hidráulica – Facultad de Ingeniería – UNNE. 3º Edición. Extensión Universitaria – UNNE. Resistencia.
- SMN Servicio Meteorológico Nacional. <http://www.smn.gov.ar/>.

ABSTRACT

Today’s society demands high comfort conditions to carry out activities with high productivity, in the Argentine Northeast achieving the appropriate conditions of temperature and humidity in old buildings involves excessive power consumption. It is presented the computer simulation by the Energy Plus software about thermal behavior of a classroom in the building of the *Facultad Regional Resistencia* of the *Universidad Tecnológica Nacional*. The simulation results are validated with measured data of indoor temperature for the same exterior conditions of solar radiation and temperature. Is obtained the instantaneous thermal charge and the decrease of potential consumption of electricity for air conditioning in different cases of thermal rehabilitation. The accuracy of the model is verified by comparing the simulation results with internal data measured in the classroom. The ability of the software as a tool to improve the energy efficiency of buildings and ensure comfort conditions is also demonstrated.

Keywords: Electricity savings, Energy Plus, Thermal simulation, Educational building