



Ciencia y Tecnología

"Divulgación de la
Producción Científica y Tecnológica
de la UNR"

CTIX

Orellano, Elena

Ciencia y tecnología 2016: divulgación de la producción científica y tecnológica de la UNR/ Bulacio, Lucía; Pairoba, Claudio; coordinado por Elena Orellano, Lucía Bulacio, Claudio Pairoba, Patricia Ponce de León, Jorge Molero. 1a ed. Rosario: UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario, 2016.

2037 p. : CD-ROM, PDF

978-987-702-187-5

1. Ciencia y Tecnología. I. Bulacio, Lucía; Pairoba, Claudio. II. Orellano, Elena, coord. III. Bulacio, Lucía, coord. IV. Pairoba, Claudio, coord. V. Ponce de León, Patricia, coord. VI. Molero, Jorge, coord. VII. Título.

CDD 660 336

978-987-702-187-5

© Orellano, Elena 2016
Universidad Nacional de Rosario



UNR Secretaría de
Ciencia y Tecnología

**Fundación
Nuevo Banco de Santa Fe**

**UNR
EDITORIA**



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



Libro
Universitario
Argentino

CiN REUN

Red de Editoriales
de las Universidades Nacionales
de la Argentina

UNR Editora

Editorial de la Universidad Nacional de Rosario
Secretaría de Extensión Universitaria
Urquiza 2050 - S2000AOB / Rosario, República Argentina
www.unreditora.edu.ar / editora@sede.unr.edu.ar

FÍSICA DE EDIFICIOS: DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DIDÁCTICA DE CARÁCTER INTRODUCTORIO BASADA EN ENERGYPLUS

Coronato, T.¹; Giles, J.¹; Abalone, R.^{1,2}; Gastón, A.^{1,2} y Navone, H.D.^{1,2}

¹Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (Universidad Nacional de Rosario); ² Instituto de Física de Rosario (CONICET-Universidad Nacional de Rosario)

E-mail: tanea.co@gmail.com

Introducción: La situación ambiental actual -así como su proyección evolutiva hacia aquellos escenarios considerados como más probables- indica que los modos dominantes de producir, de consumir y de habitar el planeta están afectando las cualidades y la dinámica de los sistemas de sustento de vida en todas sus escalas. Desde esta perspectiva, y atendiendo al carácter anticipatorio propio de toda función educativa, resulta imprescindible explorar posibles estrategias didácticas que introduzcan explícitamente esta problemática en la formación inicial de profesionales en todos los campos del conocimiento. En este sentido, el análisis del impacto ambiental generado a partir del “consumo” de energía en cada uno de los procesos y servicios involucrados en las actividades de carácter antrópico es una temática de fundamental importancia para la formación inicial en Física y en disciplinas relacionadas con este área del conocimiento. En particular, el ambiente construido -cuyo mayor exponente son las edificaciones y los aglomerados urbanos, en constante crecimiento- es uno de los sectores que más energía demandan en la actualidad (Álvarez García, 2013; Mihelcic y Zimmerman, 2012). Tal es así, que el impacto de políticas públicas de “ahorro energético” en este sector es muchas veces interpretado -en términos simbólicos- como una nueva fuente de energía.

Propósitos y objetivos: A partir de las premisas de trabajo expuestas, el objetivo de este estudio ha sido diseñar una estrategia didáctica que posibilite la introducción de esta problemática en la formación inicial de los Licenciados en Física, tratando de desarrollar competencias en todas las dimensiones que ella involucra. A tal efecto, y dada la importancia que adquiere la modelización computacional en el desarrollo de esta propuesta, se seleccionó como espacio curricular de aplicación a la asignatura electiva Física Computacional -pertenciente al 5º año de la Licenciatura en Física de la Universidad Nacional de Rosario- con el doble propósito de: (1) dar continuidad a miniproyectos computacionales basados en la modelización de procesos de transferencia de calor sobre diversos elementos constructivos usando la metodología de diferencias finitas y (2) oficiar como *trayecto o dispositivo articulador* hacia el desarrollo de trabajos finales de grado en esta temática. Este programa de investigación educativa requiere de la interacción pedagógica con *textos del saber* de distinto

nivel de transposición así como la incorporación de perspectivas socio-políticas y éticas; todo esto a los efectos de promover competencias conceptuales, metodológicas, computacionales y comunicacionales propias de este campo problemático, que podríamos situar en la intersección entre: Física Computacional, Física Interdisciplinar y Física Ambiental; y atravesado, en esta propuesta, por contenidos de Termodinámica y de Procesos de Transferencia de Calor. Al referirnos a *textos transpuestos* -esto es, a textos que contienen objetos con algún grado de transposición para su enseñanza (Chevallard, 2009)-, en el contexto de este estudio y en términos operativos, quedan caracterizados como: transpuestos para la enseñanza de una temática (apuntes, libros de texto, ejemplos); poco transpuestos para la enseñanza (manuales de uso de una aplicación, casos de estudio) y no transpuestos para la enseñanza (artículos o “papers”).

Aspectos metodológicos y recursos: Teniendo en cuenta los propósitos y objetivos de carácter educativo que nos hemos propuesto, se eligió como herramienta y estrategia metodológica recurrir a la modelización computacional del “consumo energético” en edificios usando el motor de cálculo *EnergyPlus* -aplicación de fuente abierta y de distribución libre desarrollada por el Departamento de Energía de Estados Unidos- para, luego, definir un estudio de caso a partir de trabajos existentes en la literatura, simplificándolo y adaptándolo a los requerimientos de posibles escenarios educativos.

EnergyPlus se basa en una descripción de la infraestructura del edificio –constituyéndose en el objeto de estudio- que realiza el investigador o el diseñador (ya sea trabajando desde el campo de la Ingeniería, de la Arquitectura o de la Física, entre otros posibles), incluyendo el diseño constructivo, los sistemas de climatización, las diversas cargas térmicas previstas, los flujos de aire debido a infiltraciones y renovaciones, etc. El programa calcula las cargas de refrigeración y de calefacción necesarias para mantener la temperatura deseada en cada uno de los ambientes definidos y permite analizar la evolución de la temperatura en cada uno de ellos, así como también obtener el comportamiento térmico de los distintos componentes constructivos (Coronato, 2015).

Puesto que *EnergyPlus* no cuenta con una herramienta gráfica de trabajo que permita definir el diseño del edificio, resulta aconsejable incluir un complemento que permita realizar esta tarea; en esta propuesta hemos elegido la aplicación *Sketch Up Make* (SUP, 2015) de acceso libre. Ahora bien, para poder conectar este complemento con el *EnergyPlus* es necesario instalar una aplicación adicional -*Open Studio* (OS, 2015)- que facilita el modelado de edificios incluyendo herramientas específicas para crear las geometrías deseadas (Coronato, 2015). Sintetizando, entonces, mediante la combinación de las aplicaciones mencionadas -*Sketch Up*, *Open Studio* y

EnergyPlus-, es posible definir la geometría correspondiente al edificio que será objeto de estudio.

Para la simulación energética del edificio –ya sea en etapa de diseño, de construcción o de uso-, el *EnergyPlus* recurre al concepto de “zonas térmicas”, las que no necesariamente están materializadas en “habitaciones”, sino que se definen como aquellos espacios que –según se estima en el proceso de modelado- tienen un mismo comportamiento térmico.

En nuestro prototipo de estudio, definiremos una única “zona térmica”, sin intervención de sistemas de climatización. En este caso, el *EnergyPlus* (EnergyPlus, 2015) basa todo el cálculo en la siguiente ecuación de balance para los procesos de transferencia de calor y de materia que se consideran:

$$\underbrace{\rho_{Aire} C_{Aire} V_{Zona}}_a \frac{dT_z}{dt} = \underbrace{\sum_{i=1}^{N_{Sup}} h_i A_i (T_{SupInt_i} - T_z)}_b + \underbrace{C_{Aire} \dot{m}_{Ext} (T_{\infty} - T_z)}_c \quad (1)$$

En la Ec. 1 la incógnita es la evolución de la temperatura media de la zona térmica T_z . Los términos que intervienen en esta ecuación son: (a) energía almacenada en el aire de la zona; (b) transferencia de calor por convección desde las superficies de la zona y (c) transferencia de calor por infiltración del aire exterior. Siendo: ρ_{Aire} y C_{Aire} , la densidad y el calor específico del aire de la zona térmica, respectivamente; V_{Zona} , el volumen de la zona térmica considerada; N_{Sup} , la cantidad de superficies que componen y delimitan la zona; h_i , el coeficiente de transmisión de calor por convección para cada superficie interior de la zona térmica; A_i , el área de cada superficie interior; T_{SupInt_i} , la temperatura de la cara interna de las superficies que componen la zona; \dot{m}_{Ext} , el flujo de masa de aire exterior y T_{∞} , la temperatura del aire exterior.

Para integrar la Ec. 1 se utiliza un esquema de cálculo en diferencias finitas donde el tiempo se discretiza en intervalos de longitud Δt , de tal manera que entre dos instantes sucesivos se tiene que: $t_p = t_{p-1} + \Delta t$ y, entonces, la derivada temporal de la temperatura de la zona térmica puede aproximarse por:

$$\frac{dT_z}{dt} \approx \frac{T_z^p - T_z^{p-1}}{\Delta t} \quad (2)$$

Reemplazando la Ec. 2 en la Ec. 1, aproximando a las temperaturas de las superficies interiores –que no se conocen en el tiempo presente p - por su valor en un tiempo anterior ($p-1$) y agrupando términos, se obtiene la temperatura de la zona para el tiempo presente en función de las temperaturas en un tiempo anterior, dando lugar al siguiente esquema iterativo:

$$T_z^p = \frac{\rho_{Aire} C_{Aire} V_{Zona} \frac{T_z^{p-1}}{\Delta t} + \sum_{i=1}^{N_{Sup}} h_i A_i T_{SupInt_i}^{p-1} + C_{Aire} \dot{m}_{Ext} T_{\infty}}{\frac{\rho_{Aire} C_{Aire} V_{Zona}}{\Delta t} + \sum_{i=1}^{N_{Sup}} h_i A_i + C_{Aire} \dot{m}_{Ext}} \quad (3)$$

Ahora bien, las componentes materiales que definen la zona térmica –paredes, puerta, techo y piso, en nuestro caso- están sujetas a procesos de transferencia de calor por conducción, radiación y convección. Utilizando la ecuación de conducción del calor para resolver las temperaturas en los nodos interiores de las componentes materiales, proponiendo un balance de flujo de calor en ambas caras de los elementos apelando a la Ley de Fourier para dar cuenta de los flujos de conducción a través de las superficies, aplicando la Ley de Kirchoff y la Ley de Stefan-Boltzman para los intercambios radiativos, considerando los intercambios convectivos internos y externos presentes, y, finalmente, discretizando espacialmente el dominio y asumiendo que los flujos son unidimensionales, se completa el sistema de ecuaciones que permite resolver iterativamente la Ec. 3.

Resultados: El prototipo de estudio que seleccionamos para el desarrollo de esta estrategia educativa fue simplificado y adaptado a partir del propuesto en el artículo de Flores Larsen (2011), promoviendo el primer contacto con un *texto del saber* de carácter no transpuesto para la enseñanza; tal como adelantáramos en la introducción.

Utilizando, la combinación de *Sketch Up*, *Open Studio* y *EnergyPlus* -y a partir del contacto con textos del saber poco transpuestos (manuales y tutorials) para acceder a su utilización efectiva- nos fue posible definir la geometría descrita en la Fig. 1 (Flores Larsen, 2011); que hemos simplificado y adaptado para poder satisfacer los requerimientos educativos de esta propuesta. De acuerdo a la Fig. 1, la envolvente del prototipo de estudio queda definida por paredes de ladrillo macizo orientadas aproximadamente hacia el Este, Norte, Oeste y Sur (tomando en cuenta que toda la estructura se orienta a 17° de la línea Norte-Sur); la condición de contorno asociada a cada uno de estos elementos se define en el *EnergyPlus* como “outdoors” (esto es, expuesta a condiciones climáticas externas). Se asume que el material de la capa exterior del piso es tierra, mientras que el de la capa interior es hormigón; en el *EnergyPlus* se selecciona “ground” como condición de contorno para este elemento de la envolvente, esto es, se impone una temperatura constante para la cara inferior del suelo (18°C, en este caso). En cuanto al techo, se supone que está constituido por tejas francesas en su cara exterior y tiene madera en su interior; la condición de contorno que se asume es “outdoors”, tal como se hizo para las paredes. La puerta se considera de madera y, a los efectos de simplificar el diseño en relación al objetivo educativo de la propuesta, no se ha considerado la existencia de ventanas.

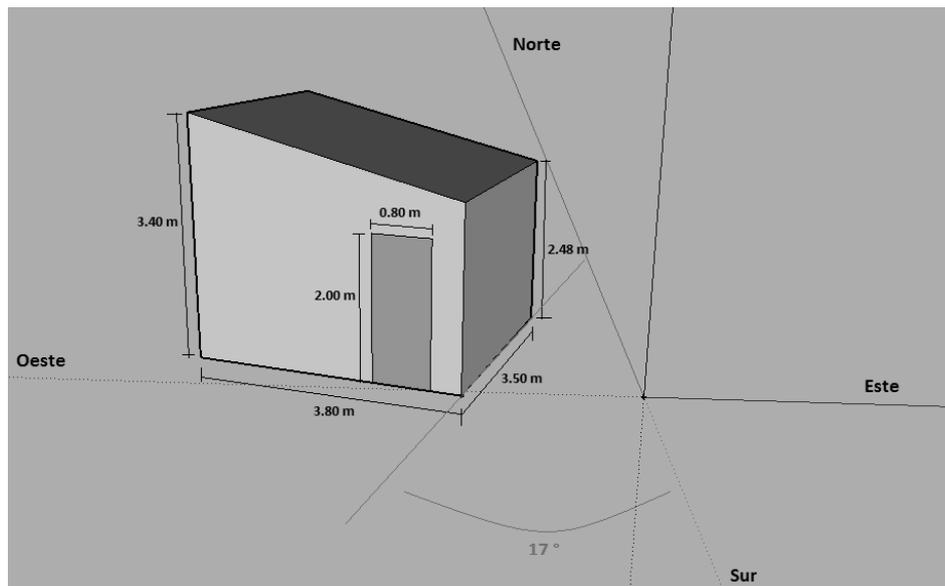


Fig. 1: Geometría, características generales de la envolvente y orientación del prototipo seleccionado como estudio de caso (Flores Larsen, 2011).

En la Tabla 1 se especifican los valores utilizados en la simulación para las propiedades termofísicas de los materiales constitutivos de la envolvente: conductividad térmica (λ); densidad (ρ); calor específico (C_p); absorptancia térmica (α_T); absorptancia visible (α_V) y absorptancia solar (α_S); así como el espesor (Δx) considerado.

Materiales	Δx (m)	λ (W/m °K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/ kg °K)	α_T	α_V	α_S
Ladrillo macizo	0.15	0.73	1797.07	919.93	0.90	0.70	0.70
Tierra	1.00	0.87	2000.00	840.00	0.90	0.70	0.70
Hormigón	0.15	1.73	2246.34	794.48	0.90	0.70	0.70
Teja francesa	0.0254	0.03	43.00	1210.00	0.90	0.60	0.60
Machimbre de pino	0.0254	0.15	608.00	1630.00	0.90	0.50	0.50

Tabla 1: Propiedades de los materiales constitutivos de la envolvente.

La simulación energética del prototipo de estudio requiere de la inclusión de la información climática correspondiente a la zona de emplazamiento del edificio. En nuestro caso, utilizamos los datos correspondientes a la zona de Rosario (Santa Fe, Argentina) a los efectos de dotar de significado al problema y de tornarlo “genuino”, en el sentido de no saber de antemano la respuesta del mismo. La ausencia de referencias con las cuales comparar en forma directa nos permitió introducir significativamente una serie de aspectos a tener en cuenta en este tipo de trabajos: relaciones entre modelo y realidad; ajuste y validación de modelos; incertezas de carácter cognitivo y metodológico; variables de ajuste; consideraciones, postulados y

supuestos; entre otros tantos aspectos que hacen al desarrollo de competencias profesionales generales y específicas en la temática abordada.

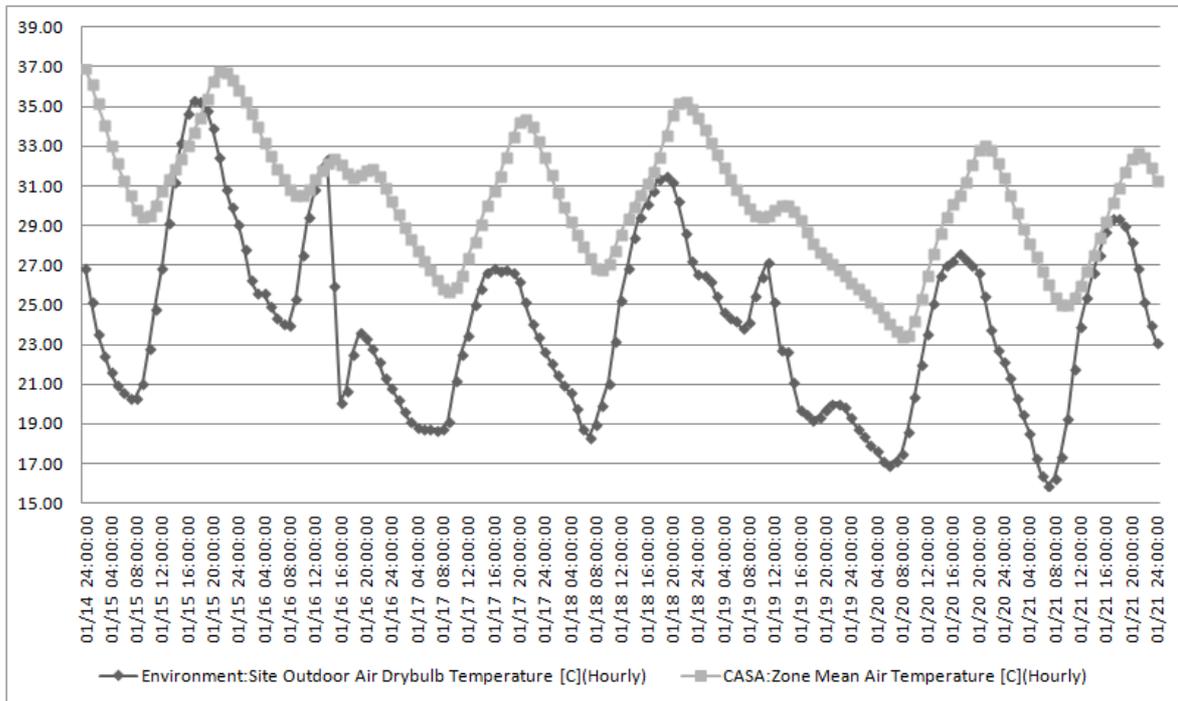


Fig. 2: Variación de la temperatura en el exterior y en el interior del prototipo de estudio en el período 14/01 al 21/01.

Las simulaciones desarrolladas permitieron obtener la evolución de la temperatura interior del prototipo de estudio, en respuesta a las condiciones climáticas de la región geográfica de emplazamiento y para dos períodos típicos de verano (Fig. 2) y de invierno (Fig. 3).

En términos de resultados directos, la puesta en práctica de la estrategia didáctica diseñada produjo: (1) el desarrollo de diversas competencias académicas y profesionales de carácter general, que adquirieron especificidad al situarse, posteriormente, en un dado campo de trabajo y en una línea de acción en investigación; (2) la edición de un manual introductorio al *EnergyPlus* para ser utilizado en la asignatura mencionada y/o como preparación para futuros trabajos de formación de grado en esta temática, realizando una experiencia de escritura y transformando el conocimiento en este proceso al considerar las expectativas de futuros destinatarios (Carlino, 2009) y (3) la definición y construcción de un prototipo o caso de estudio, con el análisis de todas sus consideraciones, simplificaciones y supuestos.

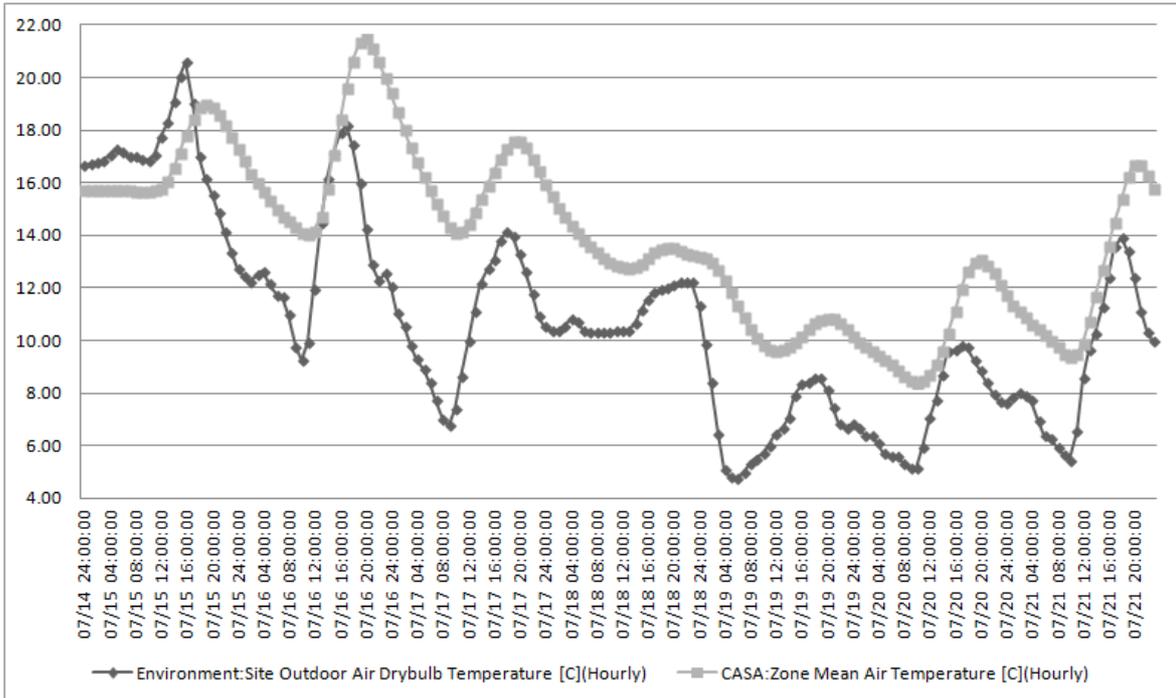


Fig. 3: Variación de la temperatura en el exterior y en el interior del prototipo de estudio en el período 14/07 al 21/07.

Conclusiones: El diseño de dispositivos articuladores entre los espacios curriculares de grado de carácter usual –que, en general, adquieren la forma de asignaturas- y el trabajo final de grado, así como el desarrollo mismo de la tesina, implican el despliegue de una pedagogía propia de la transición hacia el egreso que sea capaz de promover las mejores condiciones iniciales posibles para el inicio de futuros trayectos profesionales. A partir de la evaluación de la experiencia realizada, consideramos que la estrategia diseñada cumplió en promover y enriquecer competencias académicas que son necesarias para el abordaje de un trabajo final de grado, que ofició de dispositivo de transición poniendo en valor el trabajo con textos del saber de distinto nivel de transposición y que, además, cumplió en recuperar la función epistémica de la escritura, en tanto forma de estructuración del pensamiento que lo devuelve modificado, organizando de alguna manera aquello que nos es posible pensar sobre un asunto (Carlino, 2009). Todo esto, a partir de un trabajo de carácter interdisciplinar inscripto en la zona de intersección entre Física Computacional, Termodinámica y Procesos de Transferencia de Calor, involucrando dimensiones de carácter socio-político y ético, inherentes a toda problemática inmersa en el campo de “lo ambiental”, en general, y en Física Ambiental, en particular.

Finalmente, consideramos que esta propuesta puede ser recreada para su utilización en diversos trayectos educativos en donde se desee abordar esta problemática.

Bibliografía

- Álvarez García, G. (2013). “Energía en edificaciones”. *Revista Mexicana de Física* **S 59** (2), 44-51.
- Bre, F.; Fachinotti, V.D.; Bearzot, G. (2013). “Simulación computacional para la mejora de la eficiencia energética en la climatización de viviendas”. *Mecánica Computacional* **XXXII**: 3107-3119.
- Carlino, P. (2009). *Escribir, leer y aprender en la universidad: una introducción a la alfabetización académica*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica, 200 pp.
- Chevallard, Y. (2009). *La transposición didáctica*. Buenos Aires: Aique, 200 pp.
- Coronato, T. (2015). “Manual de uso básico del software de simulación energética EnergyPlus”. Disponible en: <http://www.fceia.unr.edu.ar/~fisicomp/EnergyPlus>. Recuperado el 19/09/2015.
- Echevarría, H.D. y Vadori, G.J. (2010). *Los estudiantes de grado y sus actividades de investigación*. Villa María: Eduvim.
- EnergyPlus (2015). “Energy Plus: Energy simulation software”. Disponible en: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>. Recuperado el: 19/09/2015.
- Flores Larsen, S. (2011). “Modelización de la transferencia de calor al suelo en los programas de simulación térmica de edificios EnergyPlus y SIMEDIF”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **15**: 27-34.
- Mihelcic, J.R.; Zimmerman, J.B. (2012). *Ingeniería Ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño*. México: Alfaomega.
- OS (2015). “Open Studio”. Disponible en: <http://www.openstudio.net>. Recuperado el: 20/09/2015.
- SUP (2015). “Sketch Up Make”. Disponible en: <http://www.sketchup.com/>. Recuperado el: 19/09/2015.