

AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE MODELOS TÉRMICOS DE EDIFICIOS Y SUS INSTALACIONES EMPLEANDO TRNSYS Y GENOPT

EGUÍA OLLER, Pablo ⁽¹⁾; TRONCOSO PASTORIZA, Francisco ⁽¹⁾; FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, Marta ⁽¹⁾; GRANADA ALVAREZ, Enrique ⁽¹⁾; MÍGUEZ TABARÉS, José Luis ⁽¹⁾

peguia@uvigo.es

⁽¹⁾Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial, Área de Máquinas y Motores Térmicos

RESUMEN

El proceso de calibración del modelo térmico de un edificio y sus instalaciones se compone de varios pasos que deben definirse correctamente para poder alcanzar con éxito un resultado coherente y óptimo.

Los motores de cálculo como TRNSYS, Energyplus o DOE-2 (entre otros), permiten la definición del modelo del edificio y sus instalaciones a través de archivos de texto, los cuales pueden ser manipulados antes de la ejecución de las simulaciones. Por otro lado, dichos motores pueden ser lanzados mediante órdenes de línea de comandos, lo que constituye una ventaja a la hora de ejecutar procesos por lotes. Con todo esto, la herramienta GENOPT (GENericOPTimizationProgram) enlazada con el software TRNSYS (TRAnsientSYtemsSimulation), se muestra como una alternativa idónea a la hora de realizar el proceso de calibración.

En este artículo, se expone una manera de realizar la calibración de edificios y sus instalaciones de **forma automatizada**, para que el usuario que efectúa el proceso, consiga realizarlo sin conocimientos de la sintaxis que emplea TRNSYS ni de los algoritmos de optimización que implementa GENOPT. El código desarrollado se empleó con éxito en diferentes casos, mostrando la posibilidad de reducir los errores de nuestros modelos utilizando herramientas gráficas accesibles a usuarios no expertos.

Palabras clave: Simulación Térmica, Calibración, TRNSYS

1. Introducción

Las simulaciones térmicas de edificios constituyen una herramienta muy empleada en el ámbito de la ingeniería térmica con distintos fines. Así, se pueden emplear para el cálculo de cargas térmicas, para obtener información sobre las demandas térmicas del edificio y sobre el funcionamiento de las instalaciones de producción térmica, para el estudio de la aplicación de medidas de conservación de la energía, etc. [1]

Son numerosas las herramientas informáticas disponibles para la realización de simulaciones térmicas dinámicas y, dentro de ellas, dos herramientas destacan por encima de las demás: Energyplus [2] y TRNSYS [3]. Dichas herramientas son de código abierto, basadas en archivos de texto y con la posibilidad de ejecutar los procesos por lotes. Esto les confiere la posibilidad de calibración de modelos mediante algoritmos matemáticos específicos que se ejecutan en procesos de máquina independientes a los de la simulación.

El proceso de calibrado de un modelo edificatorio conlleva una serie de pasos que comprenden la identificación de los parámetros a calibrar, la identificación de los valores que pueden tomar dichos parámetros (de manera continua o discreta), la generación de scripts que generen la simulaciones, la aplicación de algoritmos que converjan en el menor tiempo posible y el análisis de los resultados finales [4] [5].

Este proceso conlleva por lo general una gran cantidad de tiempo, además de exigir una formación avanzada en temas como construcción, simulaciones térmicas, lenguajes de programación, etc. También se necesitará mucho tiempo de computación, ya que la ejecución de las simulaciones térmicas suele requerir un tiempo considerable y, por otro lado, el proceso de calibrado exigirá un gran número de simulaciones, que puede ir desde 100 a 1000, según el número de parámetros que permitamos variar durante el transcurso de la calibración.

2. Objetivos

El proceso explicado en este artículo consiste en modelar el edificio en un formato que sea procesable por el motor de cálculo de TRNSYS y generar scripts de calibración para lanzar la aplicación GenOpt [6] que buscará la minimización de la función de coste. Debido a la propia forma en que GenOpt actúa, una aplicación a mayores deberá desarrollarse para el cálculo de la función de coste que sea capaz de tratar los datos de registradores de temperatura, de humedad y de consumos, para poder realizar los cálculos necesarios hora a hora y devolver un valor de función de coste que pueda ser leído por GenOpt.

3. Método de trabajo

3.1. Modelado del Edificio y sus instalaciones

TRNSYS (acrónimo inglés de TRansientSYstemsSimulation) es un programa de propósito general que realiza las funciones de motor de cálculo para cualquier tipo de simulación transitoria. Su empleo es, por lo general, en el ámbito de la investigación universitaria. En TRNSYS, cualquier parte del modelo a simular, debe especificarse mediante Types, que son objetos con entidad propia, cuyas variables de estado varían a lo largo del tiempo, en función de una serie de parámetros, del momento de la simulación y del valor que van tomando todas las variables (outputs) del resto de los componentes, así como de sus derivadas. Para la completa definición de una simulación, los usuarios pueden emplear Simulation Studio, una interfaz gráfica con la que se posicionan los componentes y donde se unen las salidas de unos con las entradas de otros.

Un Type especial de TRNSYS es el Type56, que sirve para definir el BIM (BuildingInformationModel o Modelo de Información del Edificio), desde su definición geométrica hasta su zonificación y realidad de uso de cada zona (cargas internas, sistemas de calefacción o

refrigeración, medidas de confort, etc.). También existe una interfaz gráfica para la definición del BIM (programa TrnBuild).

Cuando se ejecuta una simulación en TRNSYS se debe lanzar el programa TrnExe, el cual interpreta archivos de texto plano (archivos .dck y archivos .b17) que pueden ser generados por cualquier programa. Esta característica es esencial para el proceso de calibración, pues GenOpt buscará dentro de esos archivos los parámetros a modificar y les irá dando diferentes valores según algoritmos especiales, hasta que encuentre un mínimo en la función de coste o hasta que se alcance el número máximo de iteraciones permitido.

Los archivos .dck y .b17 son generados por Simulation Studio y por TrnBuild y siguen una sintaxis estricta que no es la más conveniente a la hora de querer modificar el modelo. Es por esto que se propone el desarrollo de un nuevo tipo de definición del edificio y sus instalaciones basada en archivos .XML que, por su estructura en árbol, permiten la identificación de cualquier parámetro y sus propiedades (nombre, valor, tipo, etc.) de manera cómoda y precisa.

Dentro de la definición del BIM, es importante destacar el tipo Horario: cualquier parámetro que se especifique por valor, de tal forma que dicho valor varíe según el momento en el que se encuentra la simulación, será un Horario. Por ejemplo, la ocupación de una zona, debido a que varía según el momento del día en el que nos encontramos (o incluso según el día en el que nos encontramos), se define mediante Horarios. Todos los Horarios en la definición propuesta poseen un Multiplicador. Esto se ha realizado así para poder calibrar un horario en particular de distinta forma, según la zona a la que afecte (es decir, un mismo horario se puede usar en distintas zonas, pero su multiplicador es diferente para cada una). Otros ejemplos de horarios son, la ventilación, las infiltraciones, la iluminación, las cargas por equipos, etc.

3.2. Calibración de los modelos

GenOpt (acrónimo de GenericOptimization) es un programa de optimización que minimiza una función de coste, la cual es evaluada en un programa externo (en nuestro caso, la simulación realizada con TRNSYS). Se desarrolló con la idea de optimizar problemas donde obtener la función de coste es complicado desde el punto de vista computacional y cuando las derivadas no están disponibles o incluso no existen.

Para indicar a GenOpt qué parámetros se pueden modificar y entre qué valores se modificarán, se emplean archivos de texto, los cuales definen, además de los parámetros, cómo obtener el valor de la función de coste, qué archivos deben de ser copiados en cada simulación, qué comandos emplear para realizar la simulación y otros parámetros como el máximo número de iteraciones permitido o hasta dónde se puede incrementar la precisión de cada parámetros involucrado en la minimización de la función de coste.

Todas estas características lo convierten en la herramienta ideal para desarrollar un sistema de calibración automatizado. En nuestro modelo de definición del edificio, se tendrá en cuenta que cualquier parámetro será susceptible de ser calibrado. La Tabla 1 muestra qué elementos pueden ser calibrados dentro de la especificación BIM propuesta.

Tabla 1: Parámetros que permite la calibración automática

Tipo de valor	Rango de Valores	Tipo de Rango	Ejemplos
Numérico	[min; max]	Continuo	Espesor de una capa, conductividad térmica de un material, conductividad lineal de un puente térmico, etc.
Lista	valor1, valor2,...	Discreto	Identificador de vidrio de una ventana
Horario	[min; max]	Continuo	Cualquier tipo de horario (de ocupación, iluminación, ventilación, etc.)

Dentro de nuestros objetivos estará poder definir el proceso de calibración mediante una interfaz gráfica que oculte toda la sintaxis de TRNSYS y GenOpt al usuario que la desconoce y así definir los parámetros de manera más intuitiva.

Por último, es necesario tener un control amplio sobre los resultados que genera el programa (TRNSYS), ya que el proceso de calibración emplea datos reales para obtener el error cometido (función de coste). Así, las simulaciones no solo deben arrojar resultados, sino que se debe además saber de qué tipo son (unidades), a qué zonas pertenecen y en qué momentos se producen. En nuestro modelo, por lo tanto, se pueden especificar datos reales de Temperatura, Humedad y Consumos Energéticos. Cuando cada simulación acaba, un proceso especial arranca, cargando todos los resultados de simulación y calculando la desviación respecto a los datos registrados por los sensores.

Existe otro proceso que se debe automatizar y que es el de homogeneizar los datos registrados para que se puedan comparar con los resultados de las simulación. Según el registro de datos reales que estemos realizando, podremos contar con datos cada segundo, cada minuto o con otra frecuencia cualquiera, incluso con frecuencias variables. La simulación, por otro lado, tendrá un Time-Step que no tiene por qué coincidir con dicha frecuencia. Es por esto que se ha desarrollado código que calcula las medias de los datos proporcionados por los registradores de temperatura y humedad para poder comparar los resultados proporcionados por la simulación con los datos correspondientes a los registradores.

Por último, se debe definir la Función de Coste, que en nuestro caso será el error medio cuadrático normalizado CV(RMSE) calculado según en la Ecuación 1 (para el caso de temperaturas).

$$CV^i(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{sim}^i - T_{real}^i)^2}{n}}}{T_{real}} \quad (1)$$

Donde, $CV^i(RMSE)$ representa el error medio cuadrático normalizado para el parámetro registrado i (en este caso será la temperatura de la zona i), T_{sim}^i representa la temperatura de la zona i , mientras que T_{real}^i representa la temperatura registrada en la zona i . El denominador representa la media aritmética de los valores de las temperaturas registradas en dicha zona. El sumatorio se extiende a todos los momentos en los que se tienen datos registrados (número que no tiene por qué coincidir con el número de datos simulados).

Si, en lugar de temperaturas, se emplease cualquier otro valor registrado (como, por ejemplo, consumos energéticos), se podrá calcular el error medio normalizado de la misma forma.

La Figura 1 resume el proceso de definición del BIM y de la calibración.

4. Resultados alcanzados

El método descrito para la modelización del edificio y la calibración del mismo se ha desarrollado mediante aplicaciones informáticas gráficas en entorno MS Windows. La aplicación se ha desarrollado en el lenguaje C#, en forma de módulos independientes que permiten ser ejecutados mediante líneas de comandos.

La aplicación se ha empleado para simular las condiciones interiores del Colegio de Enseñanza Infantil y Primaria de San Roque de Darbo (Municipio de Cangas do Morrazo) en la provincia de Pontevedra. La Figura 2 muestra una fotografía del centro educativo (a la izquierda) y una imagen del modelo térmico (a la derecha), realizada con el plugin de OpenStudio para TrimbleSketchup.

En el centro educativo se instalaron sensores de temperatura y humedad en diferentes aulas que se han modelado como zonas térmicas diferentes. Los sensores de temperatura poseen una sensibilidad de 0.5°C. Un total de 17 sensores proporcionan datos 10-minutales de temperaturas y humedades de 17 zonas diferentes del edificio. Dichos datos se proporcionan en archivos de texto que deben formatearse de manera correcta para, a continuación, generar las medias horarias de temperaturas en cada zona donde se han instalado.

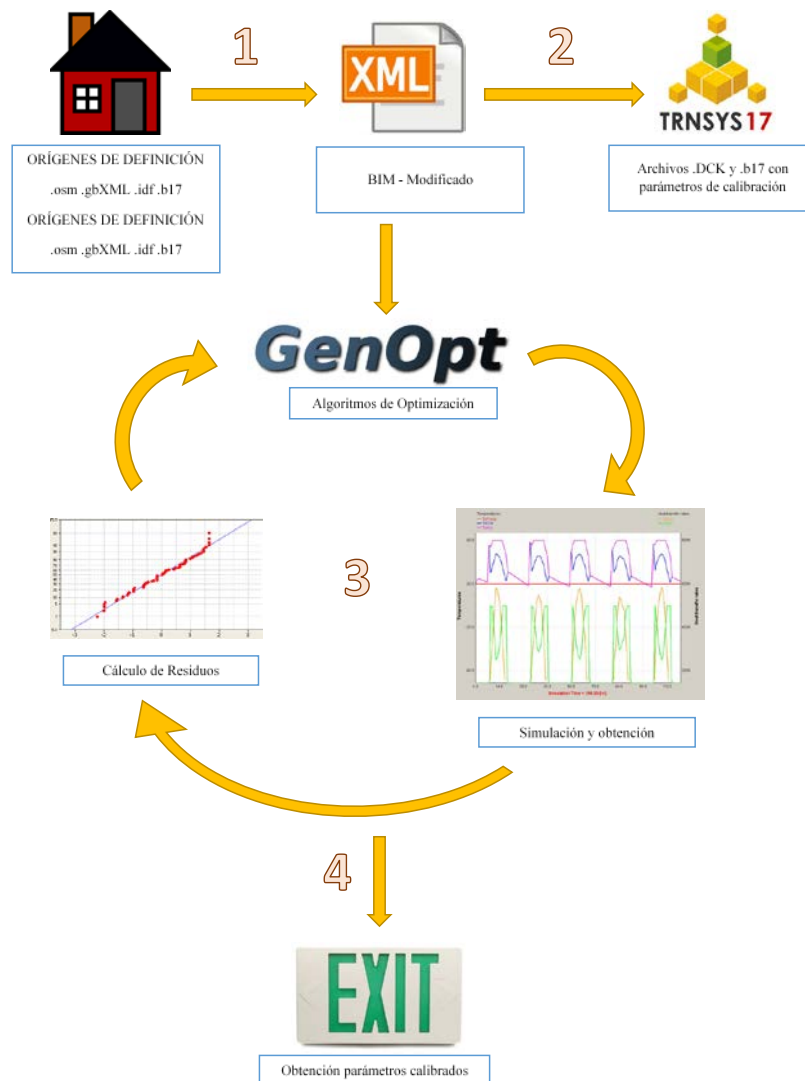


Figura 1: Diagrama de flujo de procesos seguido para la definición del BIM, la definición de la calibración, la ejecución de las simulaciones, el cálculo de la función de coste y la obtención de los parámetros calibrados.

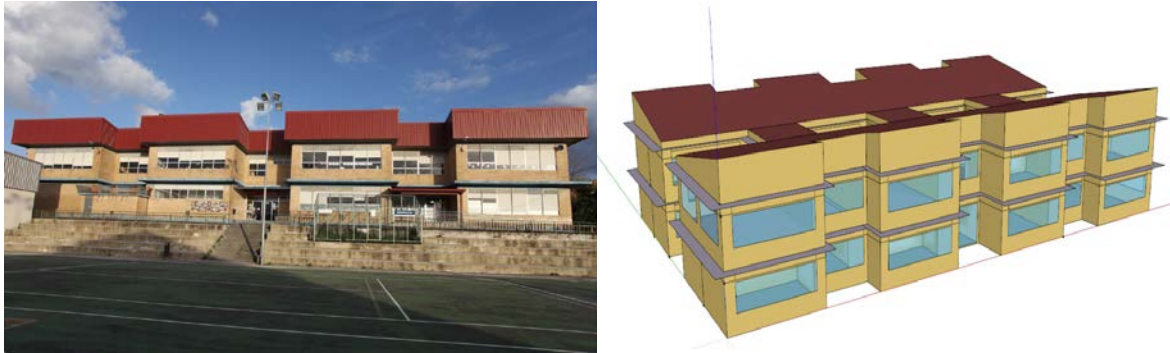


Figura 2: Fotografía del centro educativo e imagen del modelo térmico realizado con la herramienta OpenStudio y Trimble Sketchup

En dicho edificio se realizaron pruebas de transmitancia de muros y vidrios, se midió la ocupación con mucha precisión según los horarios de clases, se introdujo la iluminación tal y como existían en cada aula y distribuidores y se introdujeron las cargas por equipos exactas. De esta forma, se considera que el único parámetro a calibrar son las infiltraciones, en especial las debidas a ventanas y puertas abiertas en ciertos momentos del día.

El proceso de calibrado automático queda reflejado en la Figura 3, donde se puede apreciar cómo la función de coste va reduciendo su valor hasta llegar al mínimo al cabo de 172 iteraciones. En la Figura 4 se representa el valor del multiplicador que se asocia al horario de infiltraciones de 7 tipos de zonas diferentes. Se observa cómo van variando hasta que al llegar a la iteración 156 comienzan a estabilizarse, continuando el proceso hasta que GenOpt considera que se ha alcanzado el mínimo en la función de coste.

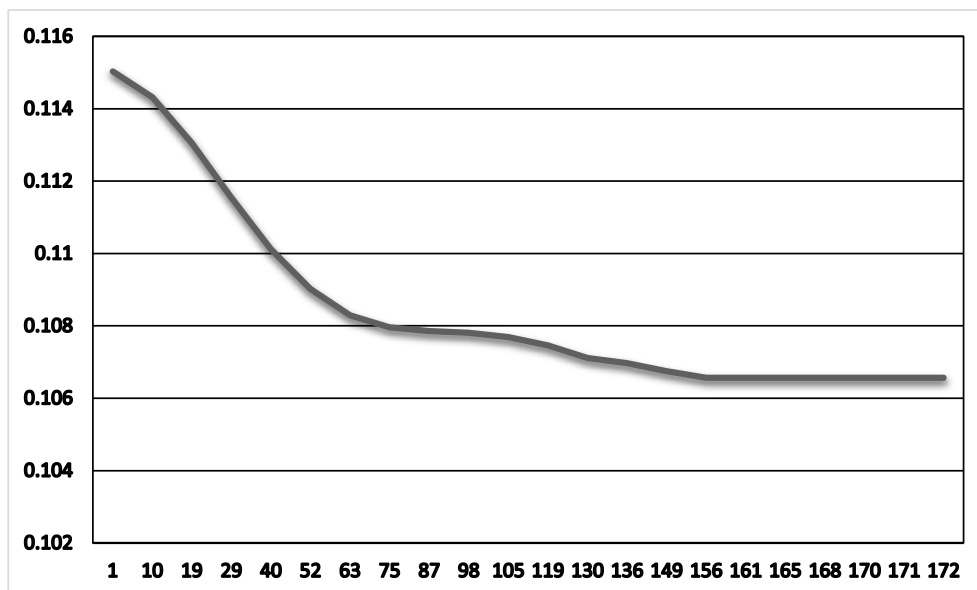


Figura 3: Evolución de la función de coste según el número de iteraciones

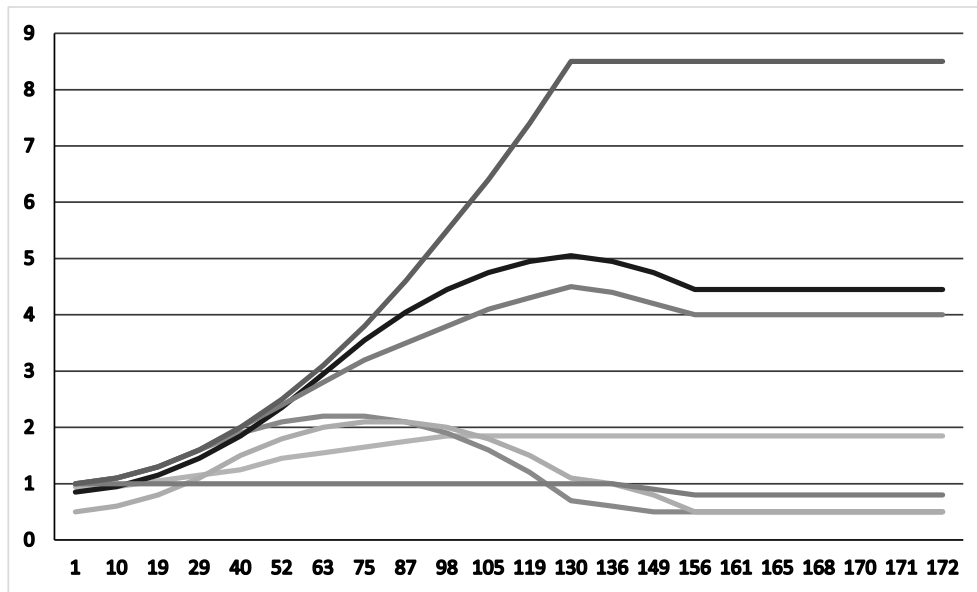


Figura 4: Evolución de los valores de los parámetros durante la calibración del modelo. Los parámetros comienzan con un valor igual a 1 y terminan con un valor entre 0 y 9.

Se parte de un valor de multiplicador igual a 1 y se obtienen los valores de multiplicador que quedan reflejados en la Tabla 2. Se puede observar cómo aumentan las infiltraciones en las zonas de aulas y administración, mientras que se reducen las infiltraciones del resto de zonas. La infiltración de las zonas de bajo cubierta también está mayorada, aunque en dichas zonas no son habitables y no poseen sistemas de calefacción.

Tabla 2: Valores finales de los parámetros tras el proceso de calibración

Zona	Valor de multiplicador final
Cubiertas de Aulario y Administración	1.85
Falsos Techos	0.5
Aulas	4.45
Administración	4
Distribuidores Aulas	0.5
Distribuidores Administración	0.8
Gimnasio	8.5

El error medio total se reduce desde un 6.3% hasta el 1.3% y el CV(RMSE) total se reduce desde un 12.3% hasta un 10.5%.

5. Conclusiones

Las simulaciones térmicas de edificios conllevan una gran cantidad de tiempo de modelado. Por otro lado, la calibración del modelo para conseguir que los resultados se ajusten a la realidad, también

conlleva mucho tiempo de definición. Es necesario pues conseguir rebajar los tiempos de ambas tareas para que las herramientas se puedan usar de manera habitual en proyectos edificatorios de edificios nuevos y de edificios existentes.

En este artículo se presenta el trabajo desarrollado para conseguir rebajar el tiempo de calibración del modelo, atacando el problema desde distintas vertientes

- por un lado, encapsular el trabajo de generación de los archivos necesarios para ejecutar las simulaciones (en TRNSYS, los archivos .dck y .b17).
- en segundo lugar, automatizar el proceso de generación de scripts para la calibración, evitando tener que aprender la sintaxis y el empleo de diferentes algoritmos de optimización por parte de usuarios no preparados para ello.
- en tercer lugar, disponer de una interfaz que permita definir qué salidas de la simulación se deben comparar con datos registrados y, así, calcular la función de coste sin necesidad de programar código ninguno

Mediante esta filosofía, se ha desarrollado un entorno de calibración que permite, a partir de modelos BIM definidos de manera especial, la calibración del modelo de manera rápida, exigiendo al usuario conocimientos de construcción y no de modelización, programación ni optimización.

El proceso ha sido empleado con éxito en el Colegio de Enseñanza Infantil y Primaria de San Roque de Darbo con resultados positivos, donde los errores medios se redujeron en un 80% y el error medio cuadrático normalizado en un 14.6%.

Futuros trabajos deberían ir orientados a la consecución de sistemas expertos que sean capaces de predecir qué parámetros deben ser los que calibren, entre qué valores calibrarlos y qué algoritmos emplear para reducir la función de coste.

6. Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada a través del proyecto ITC- 20133033 TERESE3 subvencionado por el CDTI y Fondo Tecnológico -FEDER 2007-2013 Innterconecta apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad y Consejería de Economía e Industria a través Axencia Galega de Innovación (GAIN) de la Xunta de Galicia.

7. Referencias

- [1] REDDY Agami, MAOR Itzhak. *Procedures for Reconciling Computer-Calculated Results with Measured Energy Data*. ASHRAE Research Project 1051-RP. (9/2003-1/2006).
- [2] *EnergyPlus*. [en línea]. Disponible en: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> [Consulta: febrero 2015]
- [3] TRNSYS. *A TRaNsientSYstems Simulation Program*. [en línea]. Disponible en: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/> [Consulta: febrero 2015]
- [4] SUN, J. REDDY, T.A. *Calibration of Building Energy Simulation Programs using the Analytic Optimization Approach*. HVAC&R Research Journal, vol. 12, no. 1, pp. 177-196, Enero.
- [5] REDDY, T.a., 2006. *Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty and Tools*. ASHRAE Transactions, vol 112(1), Enero.
- [6] GENOPT. *Generic Optimization Program*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Universidad de California. <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/> [Consulta: febrero 2015]