

ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES SEGÚN LINEAMIENTOS DEL SISTEMA DE CERTIFICACIÓN LEED A PARTIR DEL USO DE LA HERRAMIENTA *AUTODESK ECOTECH ANALYSIS*:

Calibración del *Building Information Model* (BIM)

Por:

**Juan José Arango Mendoza
María Andrea Fernández Bastos**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2013**

**ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE
ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
SEGÚN LINEAMIENTOS DEL SISTEMA DE
CERTIFICACIÓN LEED A PARTIR DEL USO DE LA
HERRAMIENTA *AUTODESK ECOTECH ANALYSIS*:**

Calibración del *Building Information Model* (BIM)

Autores:

**Juan José Arango Mendoza
María Andrea Fernández Bastos**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Electricista**

**Director: MSc. GERMÁN ALFONSO OSMA PINTO
Codirector: Dr. GABRIEL ORDONEZ PLATA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2013**

AGRADECIMIENTOS

Al culminar esta etapa es necesario mirar hacia atrás y agradecer a quienes nos apoyaron en el desarrollo del presente proyecto.

Gracias a Dios y a nuestras familias por su apoyo incondicional.

Gracias a mi compañero(a) de proyecto por su compromiso y dedicación.

Gracias al director y codirector de nuestro proyecto por sus consejos, seguimiento constante a este trabajo de grado y sus valiosas orientaciones.

Gracias a la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales por permitirnos trabajar en sus instalaciones y por brindarnos su colaboración para el buen desarrollo del presente proyecto.

Doy gracias a Dios porque ha permitido que este trabajo llegara a buen término, a los profesores que apoyaron este proyecto, a mi familia porque siempre me alentaron a seguir adelante en los momentos que tuve dudas, a Giovanni por ser un amigo incondicional y por último, de manera muy especial, a mi amada compañera María Andrea porque durante todo mi paso por la universidad estuvo a mi lado apoyándome, impulsándome a ser mejor y llenando mi camino con experiencias inolvidables y enriquecedoras.

Juan José Arango Mendoza

*A Dios por ser mi constante guía.
A mis padres, Pablo y Yolanda, por su amor incondicional, por ser ejemplo de vida y mi modelo a seguir.*

A mis hermanas Pao y Pili por su constante apoyo, por ser mi complemento y mis mejores amigas.

A mi amigo, compañero de proyecto y de aventuras Juan José por siempre estar a mi lado, por las risas y los bonitos momentos compartidos.

A mis amigos José, Jerson y Carol por su compañía durante las últimas etapas de mi carrera y por darle un verdadero sentido a la amistad

María Andrea Fernández Bastos

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
BIBLIOGRAFIA.....	18
1. ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO	19
1.1 CREACIÓN DEL MODELO DE INFORMACIÓN DE CONSTRUCCIÓN BIM	19
1.2 CREACIÓN DEL ARCHIVO DE DATOS METEOROLÓGICOS	21
1.3 GUÍA PARA LA INTERPRETACIÓN DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON AUTODESK ECOTECT ANALYSIS	22
1.4 IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS EN ESPACIOS INTERIORES DEL EEEIE	27
1.5 PRE-EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA DEL EEEIE SEGÚN EL ESTÁNDAR LEED V3.0.....	28
2. CALIBRACIÓN	29
2.1 CAUSAS DE ERRORES EN UN MODELO BIM.....	29
2.2 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN	31
2.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN	33
2.3.1 Factores que influyen en la selección.....	33
2.3.2 Descripción del método.....	35
BIBLIOGRAFIA.....	39
3. AJUSTE DEL MODELO	40
3.1 GANANCIAS DE CALOR INTERNA	40
3.2 CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO	47
3.2.1 Características térmicas.....	47
3.2.2 Disposición física	48
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
ANEXOS	54

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fases y etapas de la metodología propuesta	15
Figura 2 Estructura del documento	16
Figura 3. Simulaciones a realizar en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	17
Figura 4 Descripción gráfica de la creación del BIM	20
Figura 5 Modelo geométrico del EEEIE en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	20
Figura 6 Procedimiento seguido para la creación del archivo del clima.....	21
Figura 7 Análisis de confort térmico	23
Figura 8 Distribución anual de temperaturas del aula 515 para el modelo aún sin calibrar.	23
Figura 9 Análisis de las cargas espaciales.....	24
Figura 10 Análisis de exposición solar día de la fachada Sur-Interna Aula 515 el 1 de diciembre correspondiente a la pared Sur-interna	26
Figura 11 Causas de error en el modelo.....	30
Figura 12 Esquema de la metodología empírica	32
Figura 13 Diagrama de flujo para la calibración del BIM.	35
Figura 14 Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según <i>Ecotect</i> (azul) para el modelo aún sin ajustar.....	41
Figura 15 Parámetros básicos de entrada del modelo sin ajustar.....	42
Figura 16 Parámetros básicos ajustados a las condiciones reales del edificio.....	42
Figura 17 Condiciones climáticas del 30 de enero de 2011, similares al 9 de marzo del 2013.....	44
Figura 18 Condiciones climáticas 8 de marzo del 2011	45
Figura 19 Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según <i>Ecotect</i> para el modelo, ajustando condiciones climáticas.....	46
Figura 20 Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según <i>Ecotect</i> para el modelo, ajustando las propiedades térmicas de los materiales de construcción	48
Figura 21 Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según <i>Ecotect</i> para el modelo, ajustando las propiedades térmicas y disposición física de los elementos constructivos.....	49
Figura 22 Comparación entre la temperatura medida en sitio, la temperatura interna con el modelo sin calibrar y la temperatura para el modelo calibrado	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Salones pre-seleccionados para realizar las simulaciones en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> con sus respectivos criterios de selección	27
Tabla 2 Tabla de análisis Sensibilidad. A la izquierda se observa la ponderación de las variables y a la derecha se excluyen las variables ya calibradas [1].	32
Tabla 3 Cuadro comparativo de los métodos analizados.....	34
Tabla 4 Formato para la recolección de datos en sitio.	38
Tabla 5 Datos recolectados en el aula 515.....	41
Tabla 6 Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según <i>Ecotect</i> para el modelo aún sin ajustar	41
Tabla 7 Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según <i>Ecotect</i> para el modelo, ajustando condiciones climáticas.	46
Tabla 8 Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según <i>Ecotect</i> para el modelo, ajustando las propiedades térmicas de los materiales de construcción.	47
Tabla 9 Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según <i>Ecotect</i> para el modelo, ajustando las propiedades térmicas y disposición física de los elementos constructivos	49

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Autodesk Ecotect Analysis.....	54
ANEXO B. Ajuste de puntos críticos del BIM	60
ANEXO C. Registro de cambios.....	69

RESUMEN

TÍTULO: Análisis energético del edificio de estudios industriales y empresariales según lineamientos del sistema de certificación LEED a partir del uso de la herramienta *Autodesk Ecotect Analysis*: Calibración del *Building Information Model (BIM)**

AUTORES: ARANGO MENDOZA, Juan José**
FERNÁNDEZ BASTOS, María Andrea**

PALABRAS CLAVES: *Autodesk Ecotect Analysis*, calibración, temperatura, simulaciones, recursos naturales, *Building Information Model*.

El continuo crecimiento de la construcción de edificaciones, el respectivo consumo de recursos y las emisiones contaminantes que genera todo este proceso produce un impacto negativo al medio ambiente. En conjunto con el uso racional y eficiente de la energía, las edificaciones verdes, toman fuerza como uno de los campos principales en el diseño, construcción y remodelación de edificios, con el objetivo de generar un concepto arquitectónico que garantice el confort para los ocupantes y a su vez, se aprovechen los recursos naturales de iluminación y ventilación.

Autodesk Ecotect Analysis es una herramienta computacional diseñada para simular el comportamiento energético de una edificación y, con base en esto, brindar a ingenieros y arquitectos posibilidades de mejoras en el diseño inicial o remodelaciones que pudieran reducir potencialmente el consumo energético. Este software considera las variables meteorológicas, los materiales constructivos, la localización geográfica y las condiciones de operación, entre otros aspectos que inciden en el comportamiento térmico y lumínico de la edificación.

En este trabajo de grado se ejecuta la cuarta de cinco etapas encaminadas a la evaluación energética del Edificio de Estudios Industriales y Empresariales (EEEIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) usando *Autodesk Ecotect Analysis*. Esta etapa está dedicada a calibrar el modelo virtual de edificación.

En este documento se expone el proceso realizado para la calibración del modelo virtual del EEEIE partiendo de la selección del método apropiado según las condiciones presentes durante la realización del proyecto. En segundo lugar se determinó el plan de monitorización de las variables microclimáticas, para posteriormente, realizar los ajustes necesarios del modelo con base en las medidas realizadas en sitio. Una vez realizado el procedimiento descrito se considera que el modelo está calibrado para que sea analizado energéticamente en un trabajo de grado posterior.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director M.Sc German Alfonso Osma Pinto. Codirector Dr. Gabriel Ordoñez Plata

ABSTRACT

TITLE: Energetic analysis of Industrial and Business Studies Building according LEED guidelines and using *Autodesk Ecotect Analysis: Calibration of the Building Information Model (BIM)*.*

AUTHOR: ARANGO MENDOZA, Juan José**
FERNÁNDEZ BASTOS, María Andrea**

KEYWORDS: Autodesk Ecotect Analysis, calibration, temperature, simulations, natural resources, building information model.

In conjunction with the rational and efficient use of energy, the green buildings, is turning into one of the main fields in the design, construction and renovation of buildings, with the goal of generating an architectural concept that ensures comfort for occupants and at the same time guarantees, the best used of the natural resources of light and ventilation.

Autodesk Ecotect Analysis is a computational tool designed to simulate the energy behavior of a building and based on this, engineers and architects have the possibility to do improvements to initial design or to do renovations that could potentially reduce energy consumption. This software considers the meteorological variables, the construction materials, geographic location and operating conditions, among other aspects affecting the thermal performance of the building and light.

This thesis includes the fourth of the five stages aimed at energy evaluation of the building *Edificio de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales (EEEIE)* of the Industrial University of Santander (UIS) using *Autodesk Ecotect Analysis*. This stage refers to the calibration of the building information model.

This paper describes the process undertaken for the virtual EEEIE building model calibration starting with the selection of the appropriate method according to the conditions presented during the execution of the project. The second step is the determination of the monitoring plan for microclimatic variables, in order to make the necessary adjustments to the model based on the measurements taken on site. Once the procedure mention above is done, it is considered that the model is calibrated and is possible to be energetically analyzed on the next thesis.

* Research work

** Department of Physical-Mechanical Engineerings. School of Electrical, Electronic and of Telecommunications. Director M.Sc German Alfonso Osma Pinto. Codirector Dr. Gabriel Ordoñez Plata

INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento de la población exige un cambio en la infraestructura de igual magnitud, capaz de proveer vivienda y lugares de trabajo para las personas, y como consecuencia, también aumenta el consumo de energía.

A nivel de la región de Santander son pocas las incursiones en el campo de construcciones amigables con el medio ambiente. Hasta ahora se están emprendiendo trabajos que proporcionan conocimientos y capacitan a los futuros ingenieros en este campo.

La Universidad Industrial de Santander, la cual viene realizando la remodelación de sus edificaciones, a fin de ofrecer una infraestructura acorde con las necesidades de la comunidad académica, aún no ha establecido como política institucional el diseño enfocado al consumo racional y eficiente de la energía.

Una de las más recientes remodelaciones en el campus central de la universidad es el Edificio de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales EEEIE, la cual se realizó desde un punto de vista tradicional. Debido a esto se considera importante conocer el impacto de las estrategias implementadas en el desarrollo de las modificaciones a edificios ya construidos, como lo es el EEEIE, de manera que sirva como base para futuras remodelaciones en las demás edificaciones y que así se garantice un impacto ambiental mínimo y un alto rendimiento energético.

El Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) emprendió una investigación para determinar el nivel de sostenibilidad energética de una edificación recientemente remodelada, titulado *“Análisis energético del Edificio de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales según lineamientos del sistema de certificación LEED a partir del uso de la herramienta Autodesk Ecotect Analysis”*, a desarrollarse en cinco fases: (i) la creación del modelo de información del edificio (*Building Information Model, BIM*), (ii) la selección de puntos críticos de, posiblemente, mayor influencia en los consumos energéticos, (iii) el pre-análisis del cumplimiento de la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED [1], (iv) la calibración del modelo virtual realizado previamente; y (v) la realización de simulaciones

energéticas. En la Figura 1 se presenta un esquema de la metodología propuesta.

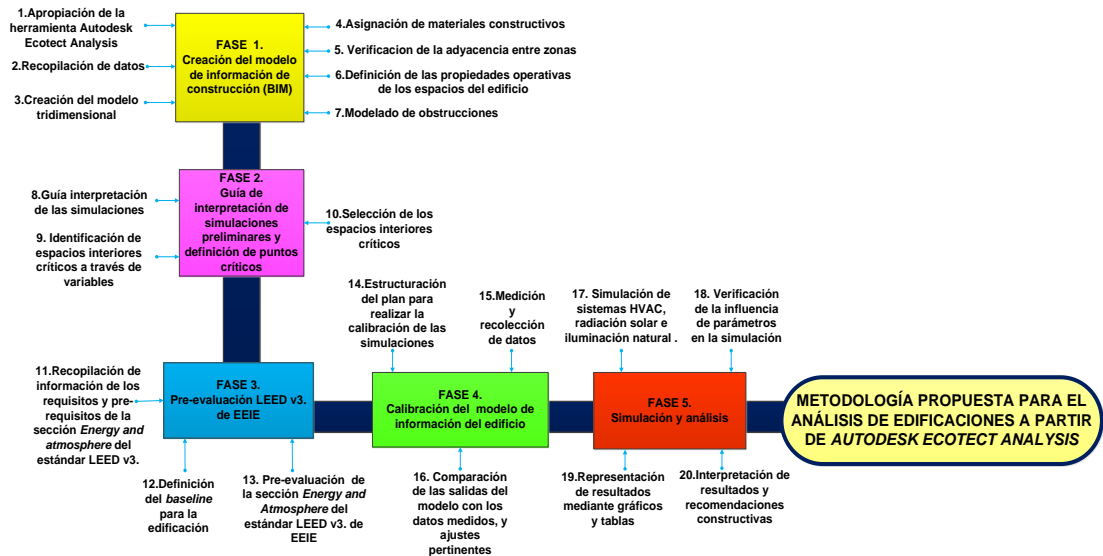


Figura1 Fases y etapas de la metodología propuesta [1]

En un primer trabajo de grado se desarrollaron las tres primeras fases de cinco, el cual se tituló “Creación del modelo de información de la edificación (BIM) e identificación preliminar de puntos críticos de potencial consumo”

El trabajo de grado que se expone en este documento está orientado a continuar con la investigación mencionada, a partir del desarrollo de la cuarta fase, donde se plantea la calibración y ajuste del modelo (BIM) creado en las fases anteriores, adaptándolo a las condiciones reales de operación de la edificación. Esto con el fin de tener una referencia útil y veraz para realizar el análisis energético [2]; y además, facilitará la definición de estrategias más eficientes de los sistemas de control del edificio [3].

Para la calibración del modelo se desarrollará una metodología donde se deberán realizar una serie de monitorizaciones de las variables microclimáticas en sitio y observar el comportamiento de la edificación ante el continuo cambio de dichas variables. Este método tuvo que ser ajustado según la disponibilidad de tiempo y recursos como se explicará en el segundo capítulo.

Posteriormente, se realizarán los ajustes necesarios al BIM y se comprobará el comportamiento adecuado de este.

DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

Como ya se mencionó anteriormente, en este trabajo de grado se lleva a cabo la cuarta fase del proyecto macro del Análisis Energético del EEEIE, dedicada a la calibración y ajuste del BIM. En la Figura 2., se presenta la metodología como se desarrollará el libro.

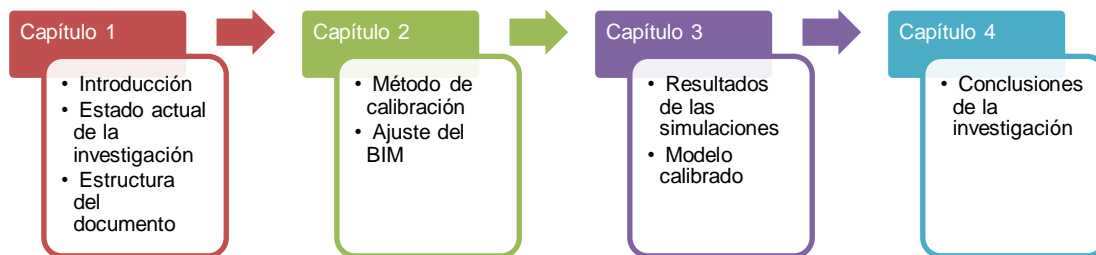


Figura 2 Estructura del documento

El primer capítulo corresponde a la introducción y estado actual del proyecto, en el cual se realiza un breve resumen del trabajo realizado previamente en el que se desarrollaron las tres primeras fases de la investigación. En el capítulo dos se explica la metodología de calibración y ajuste del modelo que fue escogida, así como también las medidas que se realizaron en sitio para poder comparar con las simulaciones. En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología expuesta en el capítulo anterior, y finalmente en el último capítulo se exponen las conclusiones y observaciones correspondientes al cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente para el presente proyecto de grado.

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Los avances en los sistemas de información y software ofrecen oportunidades para fortalecer la construcción de edificios verdes, otorgando la posibilidad de realizar estudios con gran variedad de análisis y permitiendo así tener una visión global del comportamiento de una edificación, inclusive desde las primeras etapas de su diseño [4].

Para el desarrollo de este proyecto se trabaja con el software *Ecotect Analysis*, el cual fue creado para el estudio de sostenibilidad energética de estructuras a partir de su diseño y materiales de construcción [4]. Lo más destacable de este programa es que se pueden integrar gran cantidad de datos que afectan el comportamiento energético de los edificios, los cuales permiten describir el entorno que rodea a éste, el clima al que es sometido, el tipo de actividades que se realizan y las características térmicas de la propia estructura.

La integración de estos datos permite realizar un estudio energético detallado que brinda a ingenieros y arquitectos la posibilidad de proponer ideas innovadoras a la hora de diseñar y disponer de alternativas a materiales de construcción para imponer principios de sostenibilidad en la edificación [5]. Las herramientas de análisis que ofrece *Ecotect Analysis* se presentan en la Figura 0.3. La información detallada relacionada con el software se encuentra en el Anexo A.

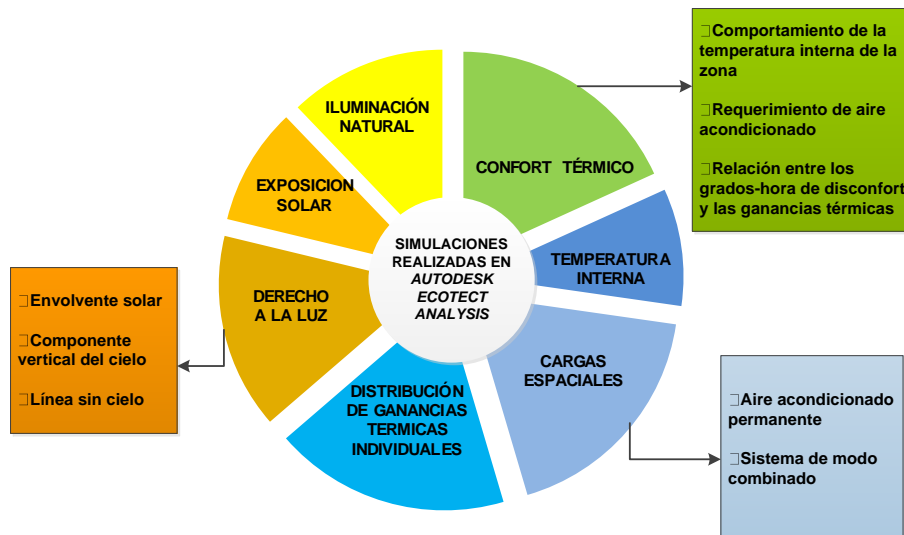


Figura 3. Simulaciones a realizar en *Autodesk Ecotect Analysis*

BIBLIOGRAFIA

[1] A. M. Rojas Herrera, M. A. López Castellanos, and I. A. Ruiz Maldonado, "Creación del modelo de información de la edificación (BIM) e identificación preliminar de puntos críticos de potencial consumo," Trabajo de grado. Director: Germán Osma. Universidad Industrial de Santander, 2012.

[2] R. S. Srinivasan, J. Lakshmanan, and D. Srivastav, "CALIBRATED SIMULATION OF AN EXISTING CONVENTION CENTER : THE ROLE OF EVENT CALENDAR AND ENERGY MODELING SOFTWARE," 2011, pp. 14–16.

[3] P. Raftery, M. Keane, and A. Costa, "CALIBRATION OF A DETAILED SIMULATION MODEL TO ENERGY MONITORING SYSTEM DATA : A METHODOLOGY AND CASE STUDY," in Eleventh International IBPSA Conference, 2009, pp. 1199–1206.

[4] wikipedia, "Autodesk Ecotect Analysis", 2011. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Ecotect_Analysis. [Accessed: 16-feb-2013]

[5] Autodesk.Inc, "Autodesk Ecotect Analysis," *Sustainable Building Design Software*, 2012. [Online]. Available: <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>. [Accessed: 17-feb-2013].

[6] Ebingel, "Certificación Leed - Colombia." [Online]. Available: http://www.ebingel.com/index.php?option=com_content&view=article&id=107&Itemid=206. [Accessed: 10-Feb-2013].

[7] ENVIRONMENT & HUMAN HEALTH INC., "Where Energy Efficiency Collides with Human Health," 2010.

[8] A. M. Fenty and R. Jasper, *LEED Certification Guidebook*, no. October. 2008.

[9] USGBC, For Public Use and Display LEED 2009 for Schools New Construction and Major Renovations Rating System USGBC Member Approved November 2008 (Updated July 2012), vol. 2008, no. November 2008.

1. ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO

En un primer trabajo de grado se realizaron las tres primeras fases de la propuesta metodológica para el “Análisis energético del Edificio de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales según lineamientos del sistema de certificación LEED a partir del uso de la herramienta *Autodesk Ecotect Analysis*”, correspondientes a la creación del BIM, la elaboración de la guía de interpretación de simulaciones y definición de puntos críticos y la pre-evaluación LEED del edificio. A continuación se expondrá de manera resumida el trabajo realizado durante las tres primeras fases. El documento se puede consultar a través de la biblioteca de la UIS : <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/146499.pdf>.

1.1. CREACIÓN DEL MODELO DE INFORMACIÓN DE CONSTRUCCIÓN BIM

El modelo de información del edificio, BIM (*Building Information Model*) fue creado en el software *Autodesk Ecotect Analysis* bajo el esquema mostrado en la Figura 4.

La creación del modelo 3D del EEEIE fue inicialmente hecha en *Graphisoft Archicad* y posteriormente exportada y ajustada en *Autodesk Ecotect Analysis*. Esto debido a que el primero ofrece mayores facilidades en la construcción de edificaciones complejas como lo es el edificio a estudiar.

Durante la construcción en *Graphisoft Archicad* se definieron las zonas térmicas, las cuales son una representación simplificada de cada área del edificio, definida como un volumen cerrado de aire homogéneo, que contiene la información sobre volumen, materiales y adyacencia con las demás zonas definidas. Al exportar el modelo a *Ecotect* para el análisis energético, se debieron realizar algunos ajustes para finalmente obtener el modelo geométrico mostrado en la Figura 5.

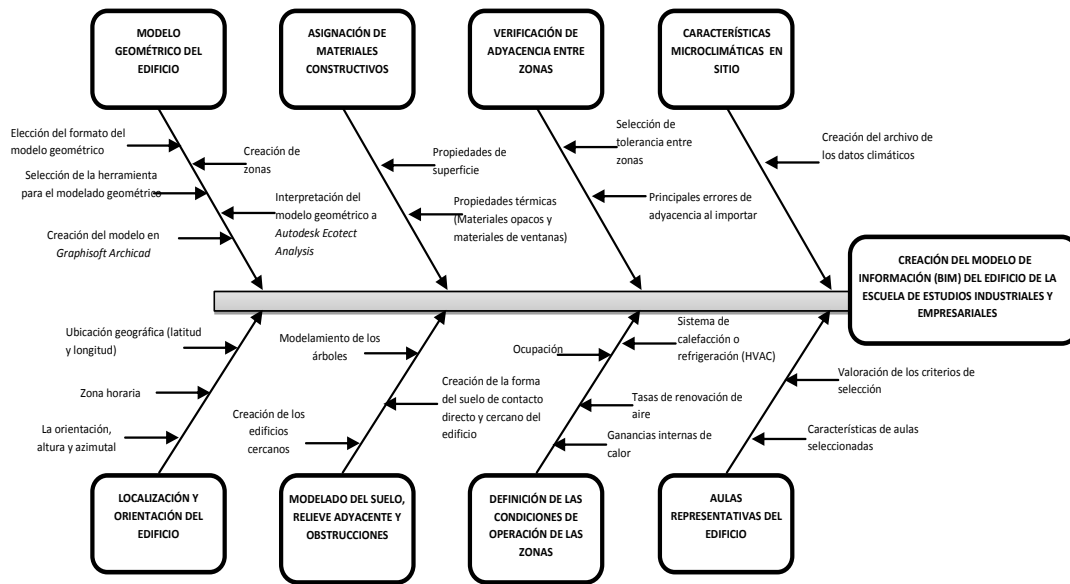


Figura 4 Descripción gráfica de la creación del BIM [1]



Figura 5 Modelo geométrico del EEEIE en Autodesk Ecotect Analysis [1]

Los materiales constructivos se asignaron según la librería de materiales disponible *Autodesk Ecotect Analysis*. La información fue extraída de los planos arquitectónicos disponibles en la página de la UIS https://www.uis.edu.co/procesos_contratacion/contrataciones/licitaciones/licitaciones_2009/licitaciones_2009.html. Además de los materiales disponibles en la librería, se definieron algunos otros materiales manualmente asignando las propiedades correspondientes de absorción de sonido, térmicas, superficies y costos.

Se definieron las condiciones de operación de las zonas en donde se especifican las condiciones internas de diseño:

- **Ocupación**, donde se cuantifican las ganancias de calor que aportan las personas dentro de la zona dependiendo de la actividad que realicen,
- **Ganancias internas** que hacen referencia a la ganancia de calor producidas por la iluminación y por otros equipos electrónicos
- Tasa de intercambio de aire
- Tipo de sistema de climatización
- Rango de temperaturas de confort

1.2. CREACIÓN DEL ARCHIVO DE DATOS METEOROLÓGICOS

Se crea el archivo de datos meteorológicos por medio de la herramienta *Weather tool*, incluida en el software de *Ecotect* donde se especifican las condiciones de climatización de la zona. Esto se hace para poder hacer el análisis correspondiente de la influencia de las condiciones climáticas en la operación de la edificación. El procedimiento para la creación del archivo de datos meteorológicos se muestra en la Figura 6.

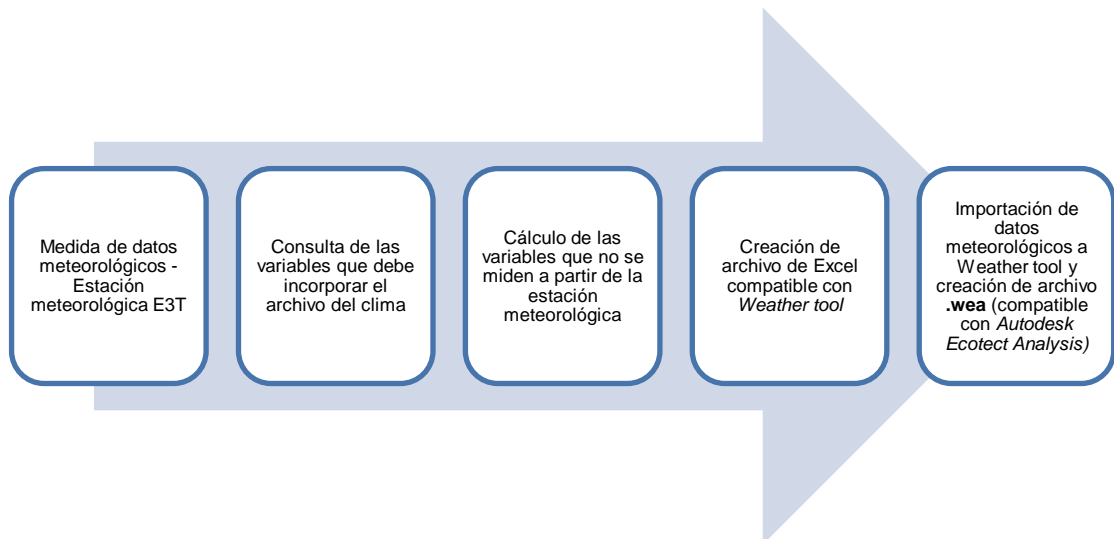


Figura 6 Procedimiento seguido para la creación del archivo del clima

1.3. GUÍA PARA LA INTERPRETACIÓN DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON AUTODESK ECOTECT ANALYSIS

Se desarrolló una guía tomando como base simulaciones térmicas y lumínicas realizadas al aula 515 del EEEIE. El análisis térmico hace referencia a las simulaciones de confort térmico, temperatura interna, cargas espaciales y a la distribución de ganancias térmicas individuales. En cuanto al análisis lumínico el software permite realizar simulaciones relacionadas con la exposición solar, el derecho a la luz y la iluminación natural. Se describen brevemente las simulaciones realizadas para que sean una guía de interpretación para el tema del presente proyecto de grado.

1.3.1. Confort térmico

Autodesk Ecotect Analysis define el confort de sus ocupantes si la temperatura ambiente de la zona analizada se encuentra dentro de la franja de confort definida previamente en los parámetros de operación de las zonas. Los grados de desconfort se calculan como la diferencia entre la temperatura del bulbo seco interna y la temperatura de confort definida.

El análisis de grados-hora de desconfort que muestra el software es un gráfico de barras en cuyo “eje x” se indican los meses del año y en el “eje y” los grados-hora de desconfort, es decir, este análisis relaciona la cantidad de grados fuera de la banda de confort definida con la cantidad de tiempo que dura esta situación. Si las barras son rojas significa que el desconfort es resultado de temperaturas demasiado altas y al contrario si estas son azules. A partir del gráfico resultante se pueden realizar análisis del comportamiento de la temperatura interna de la zona, requerimientos de aire acondicionado y relación entre los grados-hora de desconfort y las ganancias térmicas. El gráfico mencionado se puede ver en la Figura 7.

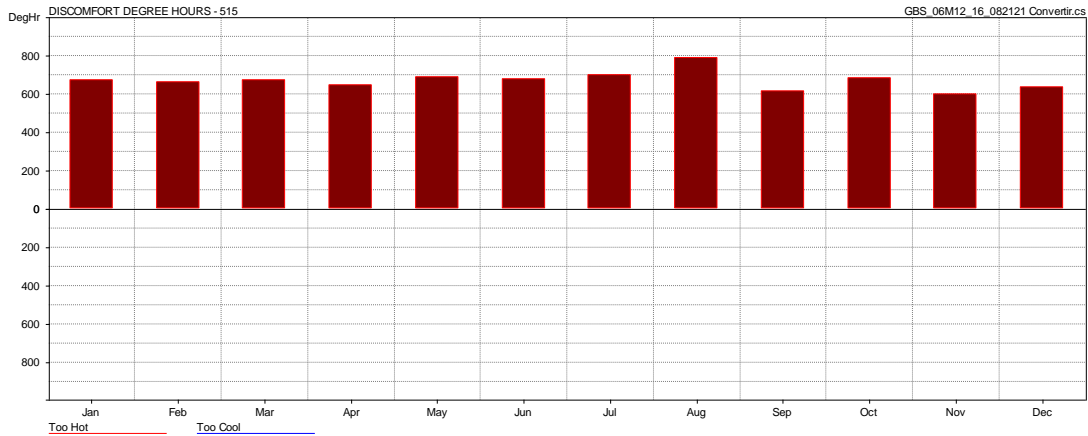


Figura 7. Análisis de confort térmico

1.3.2. Temperatura interna

Este tipo de simulación muestra la frecuencia anual (número de horas) con que una temperatura ($^{\circ}\text{C}$) se presenta al interior de la zona, teniendo en cuenta todas las horas del día. El gráfico resultante de la simulación, mostrado en la Figura 8, permite contrastar la temperatura externa que aparece como una línea punteada, con la temperatura interna de la zona, mostrada como una línea continua del color correspondiente a la zona.

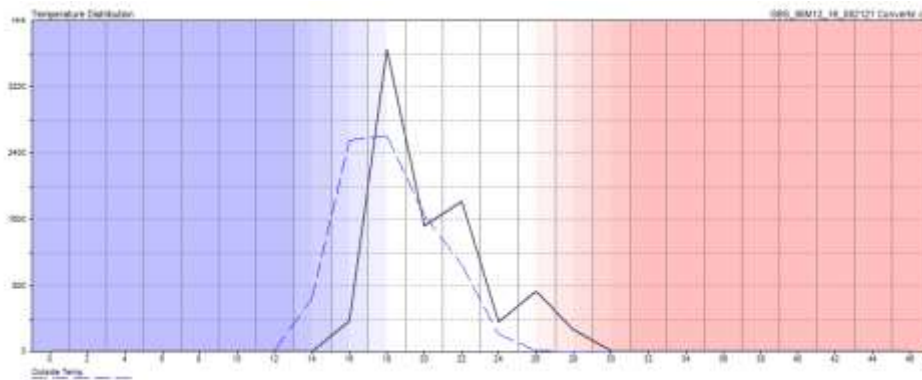


Figura 8 Distribución anual de temperaturas del aula 515 para el modelo aún sin calibrar.

1.3.3. Cargas espaciales

La carga espacial de una zona representa la cantidad de energía que debe ser añadida o extraída de un espacio para mantener la comodidad

térmica, considerando la temperatura, volumen y tiempo requerido para el uso de un sistema artificial de climatización.

Autodesk Ecotect Analysis realiza el cálculo de cargas espaciales por medio del método de admitancias CIBSE (*Chartered Institution of Building Services Engineers*), a partir del cual obtiene los parámetros que inciden en el aumento de la temperatura interna de la zona, que son:

- Ganancia solar directa.
- Ganancias internas.
- Ganancias de conducción a través de paredes y vidrios o ganancias indirectas.
- Infiltración de aire.

El gráfico de cargas espaciales mensuales muestra el total de cargas de calefacción (rojo) y enfriamiento (azul) en (Wh) requeridas para las zonas seleccionadas. En la Figura 9 se muestra el gráfico correspondiente al análisis de las cargas espaciales mensuales para el salón 515 del EEEIE con el modelo aún sin calibrar.

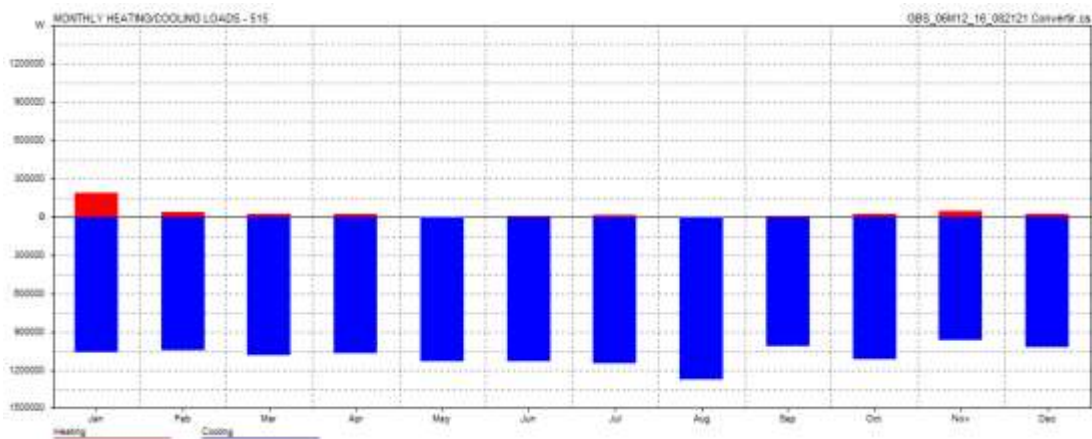


Figura 9. Análisis de las cargas espaciales

Este gráfico permite realizar un análisis de la carga espacial requerida por aula cuando funciona con aire acondicionado permanentemente o con sistema de modo combinado.

1.3.4. Derecho a la luz

Se establece como la forma de garantizar que edificaciones nuevas, construidas cerca de una existente por más de veinte (20) años, no limiten la luz natural que entra a través de las ventanas a niveles incómodos para sus ocupantes.

Las simulaciones que se realizan para conocer la forma en que los objetos adyacentes afectan su derecho a la luz son:

La envolvente solar que está conformada por planos trazados sobre cada una de sus fachadas con el fin de apreciar las partes de las estructuras adyacentes que impactarán en la disponibilidad de luz natural en su interior

La componente vertical del cielo la cual es una medida establecida por la BRE (*Building Research Establishment*) para cuantificar la luz natural que llega al centro de una ventana, consiste en la relación entre la iluminancia vertical que llega al vidrio directamente desde el cielo y la iluminancia recibida desde un cielo sin obstrucciones

La línea sin cielo que es el punto más allá del cual no se puede ver directamente ninguna parte del cielo a través de las ventanas de una habitación.

1.3.5. Distribución de ganancias térmicas individuales

Las ganancias térmicas individuales hacen referencia a los aportes de energía dentro de una zona que realizan los diferentes elementos constitutivos como muros, pisos, puertas, techos y ventanas y los demás elementos constitutivos de cada zona. Los diferentes tipos de ganancias son solar directa e indirecta, ganancias por ventilación, ganancias internas, ganancias por materiales y ganancias interzonas.

1.3.6. Exposición solar

Los análisis de exposición solar, se refieren a las simulaciones realizadas en una o más superficies planas cerradas dentro del modelo, de las que se quiera obtener información acerca de la radiación solar incidente.

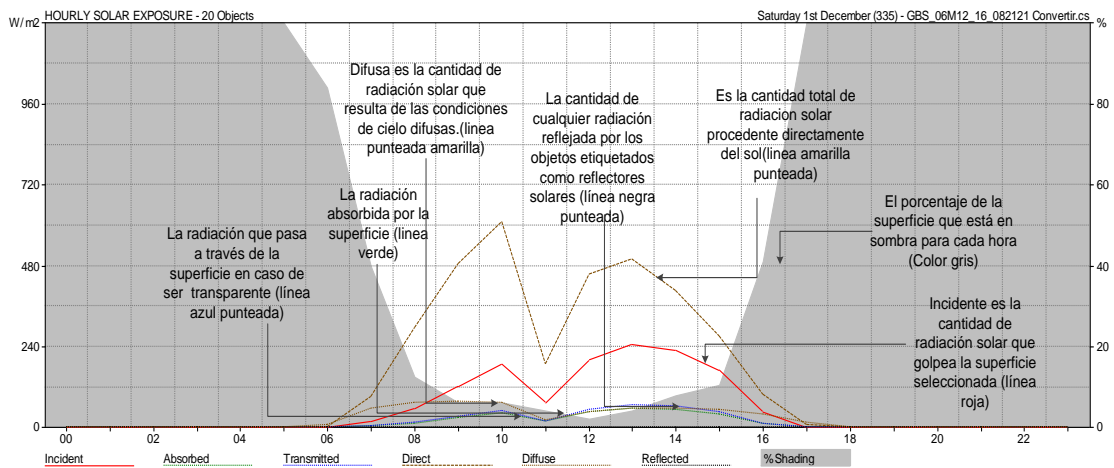


Figura 10. Análisis de exposición solar día de la fachada Sur-Interna Aula 515 el 1 de diciembre correspondiente a la pared Sur-interna

Una vez ejecutada la simulación se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 10. El eje horizontal representa las horas del día, y el eje vertical cuenta con dos escalas, en la parte derecha se encuentra el porcentaje correspondiente únicamente al cálculo de sombras y en la parte izquierda se representa la escala de la radiación dada en [W/m²] utilizadas para medir la radiación transmitida, absorbida, reflejada, incidente, directa y difusa, estas radiaciones se distinguen al graficarse de un color diferente.

1.3.7. Factor de luz día

El factor de luz día se define como el cociente entre la iluminancia en un punto determinado dentro de un recinto y la iluminancia en el mismo punto pero al aire libre, sin obstrucciones, bajo las mismas condiciones de cielo, expresado como un porcentaje. Para realizar la simulación correspondiente se debe calcular el valor de diseño del cielo, se debe establecer el modelo de distribución de luminancia o tipo de cielo, y determinar qué parte de la luz desde el exterior en realidad termina pasando a través de las aberturas de un edificio a sus espacios interiores.

1.4. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS EN ESPACIOS INTERIORES DEL EEEIE

Los puntos críticos se muestran en la Tabla 1. Estos lugares se establecieron teniendo en cuenta el comportamiento de las variables en cada zona, basándose en las simulaciones del comportamiento térmico, de radiación y de iluminación natural realizadas al modelo BIM sin calibrar. Este análisis se hizo con el objetivo de seleccionar los espacios interiores más críticos de acuerdo a su comportamiento para posteriormente calibrar el BIM teniendo en cuenta estos puntos.

De las simulaciones realizadas y analizadas como se mencionó en la guía de interpretación de simulaciones se preseleccionaron las zonas mencionadas en la Tabla 1.

Zona	Criterios de Selección
Aula 102 – Centro de estudios	Aula de mayor ocupación, área considerable, uso semanal constante, y posible carga de calor debido a la cantidad de equipos portátiles que pueden estar presentes durante las actividades de estudio desarrolladas en el sitio.
Aula 111 – Sala de Cómputo	Alta carga térmica generada por los equipos de cómputo.
Acceso Principal	Área de tamaño considerable, uso constante por ser la entrada principal, continua circulación y de las pocas que no poseen aire acondicionado.
Aula 515 – Auditorio Enrique Daccarett	Aula de mayor área de todo el edificio.

Tabla 1 Salones pre-seleccionados para realizar las simulaciones en *Autodesk Ecotect Analysis* con sus respectivos criterios de selección

1.5. PRE-EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA DEL EEEIE SEGÚN EL ESTÁNDAR LEED V3.0

Para la evaluación a realizar en el EEEIE se utilizará la versión LEED V3.0 (*new construction and major renovation*) y se restringirá solo a la categoría *Energy and Atmosphere*, pues está estrechamente relacionada con el desempeño energético de la edificación, además de que encierra el número máximo de puntos entre las categorías LEED.

El interés de evaluar el EEEIE es sólo para determinar cualitativamente su nivel de sostenibilidad energética.

Se estableció un mínimo de eficiencia energética para la edificación y sus sistemas relacionados (Iluminación y Aire Acondicionado) conforme al Apéndice G del ASHRAE/IESNA 90.1-2007, y que en el caso del EEEIE coincide con la eficiencia energética real del mismo, razón por la que el puntaje obtenido de acuerdo al estándar LEED para la categoría *Energy and Atmosphere* es muy bajo, confirmando la hipótesis inicial, ya que el edificio se construyó sin la aplicación de los lineamientos LEED.

2. CALIBRACIÓN

En los últimos años se ha trabajado con modelos virtuales de las edificaciones para analizar el comportamiento térmico, la eficiencia energética y los sistemas de automatización de los edificios; con el objetivo de reducir los costos relacionados con la demanda de energía eléctrica [1].

La calibración y ajuste del modelo a las condiciones reales en las que se encontrará y se usará el edificio, es el paso principal para desarrollar un modelo que sirva de referencia para el análisis de la construcción y que permite determinar parámetros para medir el uso eficiente de la energía [2] y además, desarrollar estrategias más eficientes de los sistemas de control del edificio [3].

Es muy común observar que los conocimientos y las descripciones del diseño disponibles son insuficientes para garantizar un comportamiento realista acorde con el propio del edificio. Esto debido a que puede haber numerosas fuentes de error, las cuales se tratarán más adelante en este capítulo, que afectan el correcto funcionamiento del modelo y en consecuencia se obtienen resultados imprecisos [4]. Por esta razón, se hace necesario contar con datos empíricos que respalden la realidad y de este modo ajustar el diseño para poder coordinar sistemas eficientes de adecuación climática.

Aunque el escenario ideal sería contar con unos datos obtenidos de un proceso largo y continuo de medidas en campo, por falta de recursos, tiempo y otras limitaciones, en este trabajo de grado se tuvo que optar por un periodo corto de mediciones en los lugares críticos del EEEIE previamente establecidos. Esto último aprovechando las herramientas que *Ecotect Analysis* ofrece al poder elegir análisis diarios del comportamiento de cada zona [4].

2.1. CAUSAS DE ERRORES EN UN MODELO BIM

Como se menciona anteriormente, en los pasos iniciales del diseño y creación del modelo (BIM) existen varias fuentes de error que interfieren en el resultado de las simulaciones recreadas. A continuación se identifican algunas de las causas de error latentes y se ilustran en la Figura 11.

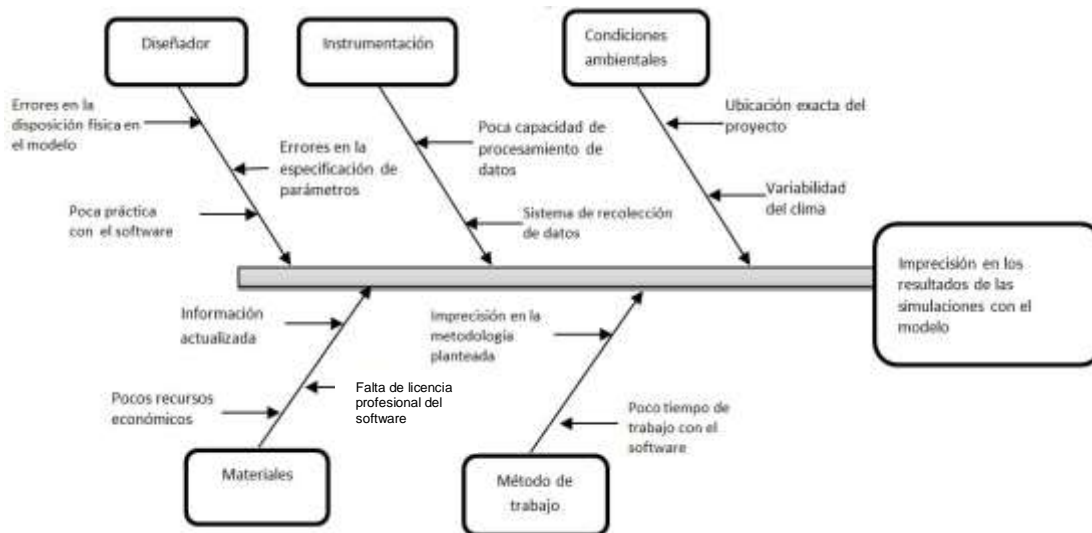


Figura 11 Causas de error en el modelo.

Se identificaron cinco categorías de posibles causas así:

- Diseñador: Un factor de alta incidencia es la práctica y la experiencia que tiene el diseñador con el manejo del software. La inexperiencia de éste puede ocasionar errores en la constitución del modelo virtual en procesos tan importantes como la definición de zonas térmicas y además puede ocasionar errores en la disposición física del modelo, de ahí surgen las diferencias entre el BIM y la configuración física real del edificio que alteran el flujo de energía previsto [5].

Las especificaciones de parámetros térmicos son otro aspecto crítico en el momento de obtener resultados precisos de las simulaciones realizadas. Esto se debe a la sensibilidad y a la importancia de los datos térmicos de entrada en el algoritmo utilizado por el programa.

- Instrumentación: Hace relación a las características de los equipos utilizados en el procesamiento y la adquisición de datos. Los instrumentos de recolección de datos climáticos y lumínicos y la forma en que se obtienen implican un error intrínseco que afectan los datos de entrada al modelo virtual [6].

La capacidad de procesamiento de datos de los computadores afecta la calidad de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en ellos.

- Materiales: Los recursos económicos son importantes para el acceso a documentación actualizada y de gran nivel académico, así como también, a

las licencias necesarias para utilizar el software sin limitación de tiempo. De igual manera, la utilización de datos climáticos actuales es un factor que asegura una confiabilidad mayor en los resultados de las simulaciones realizadas. Esto se puede resumir en “Calidad de información y de los equipos para manejarla” [7].

- Condiciones ambientales: En este proyecto en particular, la variabilidad del clima y los datos (no actualizados) recolectados de éste generan una dificultad adicional al momento de predecir el comportamiento real de la edificación.

La ubicación geográfica es otro factor que influye en los cálculos realizados por el software y para este caso se ha debido utilizar una aproximación de ésta.

- Método de trabajo: Hace referencia a las prácticas adoptadas por el diseñador al momento de desarrollar el modelo virtual. Entre estas prácticas se debe incluir la comunicación que hay entre las diferentes partes interesadas en el proyecto y el entorno que rodea a estas [5].

2.2. MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

Antes de seleccionar el método de calibración a emplear para ajustar el modelo virtual se analizaron las características, ventajas y desventajas de algunos métodos empleados en proyectos similares. Entre los métodos más usados se encuentran los siguientes:

- Calibración empírica: Se aplica a modelos de estructuras ya construidas. La calibración se hace por medio de varias simulaciones y comparando con los datos obtenidos instrumentalmente en la edificación.

Se parte de un modelo virtual constituido únicamente por la geometría del edificio, datos del clima y observaciones del autor; luego, estos primeros resultados se comparan con los datos obtenidos por los instrumentos instalados y se toman las acciones correctivas buscando la semejanza de los valores obtenidos [4]; esto se puede resumir en la Figura 12.

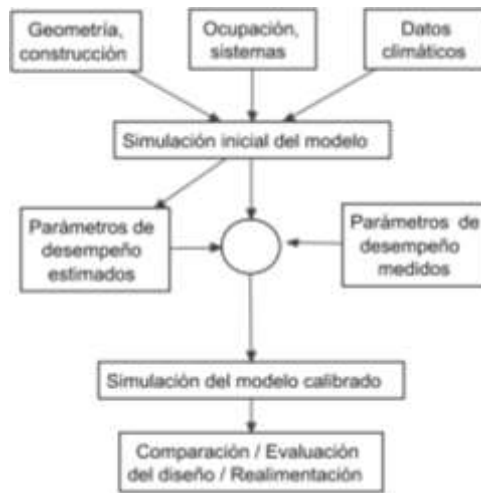


Figura 12 Esquema de la metodología empírica [4].

- Usos del análisis de sensibilidad: Cuando se desea calibrar un modelo aparece una gran cantidad de variables que afectan los resultados de la simulación, que en ocasiones son complicadas de abordar o requieren de conocimientos especializados. Con este análisis se desea identificar cuál de estas variables producen mayor error durante la simulación y darles un tratamiento especial [1]. En la Tabla 2 se muestra cómo se han ponderado diferentes variables de acuerdo al impacto que tienen en el comportamiento de cierta edificación. En esta tabla se puede apreciar que, en un primer momento, se identificó la iluminación como el factor con mayor impacto en la temperatura; por lo tanto este fue uno de los primeros parámetros ajustados. Al realizar un segundo análisis de sensibilidad la iluminación (ya ajustada) se excluye.

Todas las fuentes de calor		Excluyendo iluminación y cargas conectadas	
Iluminación	35%	Ventanas	54%
Ventanas	32%	Suelo	24%
Suelo	14%	Techo	14%
Techo	8%	Personas	6%
Cargas conectadas	7%	Infiltración	2%
Personas	3%	Muros	1%
Infiltración	1%	Cargas conectadas	-
Muros	0%	Iluminación	-

Tabla 2 Tabla de análisis Sensibilidad. A la izquierda se observa la ponderación de las variables y a la derecha se excluyen las variables ya calibradas [1].

- Método PSTAR (*Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization*): Es un método desarrollado para identificar los principales parámetros térmicos de un edificio a partir de pruebas al aire libre de corta duración. Este procedimiento se utiliza con el fin de reducir la cantidad de variables necesarias para estimar el comportamiento de los datos [8].
- Algoritmos de calibración automática: Se basa en el desarrollo de algoritmos complejos para utilizarlos en edificaciones con cambios ambientales, procesos y usos irregulares, donde los métodos convencionales no se ajustan a las necesidades (ejemplo: edificaciones de los parques temáticos en EE.UU.) [9].

2.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Se deben disponer de los recursos necesarios para poder calibrar el modelo según el método que se escoja. Debido a que son varios los factores que influyen en la elección del método a continuación se hace un análisis de cada uno de ellos para así poder escoger el más apropiado.

2.3.1. Factores que influyen en la selección

De acuerdo a la información recolectada, se puede notar que en la selección del método influyen los siguientes factores:

- Recursos económicos: El apoyo financiero tiene un papel importante en todos los proyectos de investigación y sin duda es un factor que determina su alcance
- Recursos tecnológicos: La cantidad y calidad de los equipos utilizados para el desarrollo de la investigación garantiza una confiabilidad y rapidez al momento de obtener resultados del proyecto
- Disponibilidad de tiempo: Cada método demanda una cantidad de tiempo distinta. El tiempo demandado por los diferentes métodos es un factor clave para determinar el alcance del mismo
- Relevancia del proyecto: La trascendencia de los resultados del proyecto determina la cantidad de esfuerzos que se debe hacer para llevar a cabo el proyecto

- Precisión de los resultados: Al igual que la relevancia del proyecto, la precisión de los resultados está determinada por la importancia del proyecto y por tanto, en la variación de los costos
- Lugar de implementación: El sitio donde se llevará a cabo el proyecto determina, por ejemplo, que equipos se pueden utilizar o que tanto se puede interferir en el entorno cotidiano del lugar

En la Tabla 3 se presenta un cuadro comparativo para los métodos de calibración propuestos y se analiza la influencia de cada uno de los factores presentados anteriormente. Debido a la limitación de recursos económicos, tecnológicos, y la poca disponibilidad de tiempo, se optó por el método de calibración empírico dada su practicidad y los pocos recursos que demanda en su implementación.

	CALIBRACIÓN EMPIRICA	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	MÉTODO PSTAR	ALGORITMO DE CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA
RECURSOS ECONÓMICOS	La cantidad de recursos económicos invertidos para cada método de calibración está directamente relacionada con el nivel tecnológico que se requiera. En la documentación de proyectos similares realizados no se especifica el valor de la inversión para el desarrollo de la investigación.			
RECURSOS TECNOLÓGICOS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Termómetro ▪ Estación meteorológica ▪ Equipo de computo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipo de computo ▪ Estación meteorológica ▪ Termómetro 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medidor de flujo de calor ▪ Soplador de puerta ▪ Equipo de computo ▪ Estación meteorológica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema para cuantificar la ocupación ▪ Estación meteorológica ▪ Sistema de georeferenciación avanzado ▪ Equipo de computo
DISPONIBILIDAD DE TIEMPO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se debe estimar alrededor de un año para la recolección de datos y unos meses para realizar las simulaciones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La disponibilidad de tiempo está sujeta a la experiencia del analista 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La recolección de datos se hace en un par de semanas, al igual que el proceso de iteración y simulación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se puede estimar el tiempo. Se asume un periodo corto.
PRECISIÓN DE RESULTADOS	La cantidad de esfuerzos necesarios para el desarrollo de cada método depende de la precisión, exactitud y presupuesto que se disponga para la calibración del modelo			

Tabla 3. Cuadro comparativo de los métodos analizados.

2.3.2. Descripción del método

El método de calibración empírico, como se mencionó anteriormente, se basa en la comparación entre los resultados obtenidos por simulación del modelo virtual y los datos recolectados por los instrumentos instalados en el sitio. Posteriormente se

realizan los ajustes necesarios al modelo virtual para obtener semejanzas en la comparación.

Los ajustes fueron realizados analizando únicamente las condiciones de temperatura dentro de la zona. El análisis de iluminación no pudo ser tenido en cuenta como un parámetro para calibrar el modelo debido a que no se disponen de los instrumentos necesarios para realizar las medidas en sitio.

La metodología empleada para ajustar el modelo se llevó a cabo como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 13.

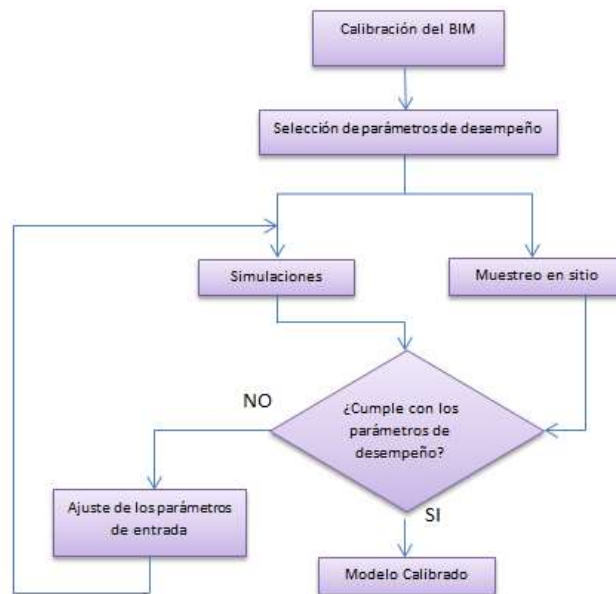


Figura 13 Diagrama de flujo para la calibración del BIM.

2.3.2.1. Identificación de los datos de entrada del modelo

Con el propósito de identificar los datos de entrada al modelo que se deben modificar para el ajuste del BIM, los parámetros se han clasificado en dos categorías: ganancias de calor interna y construcción del edificio [10].

- Ganancias de calor interna: Estos parámetros hacen referencia a los datos externos a la configuración de la estructura, es decir, a las condiciones de operación de la zona. Se caracterizan por ser de fácil observación y muestreo. Los parámetros que definen las condiciones de operación de una zona térmica se definen a partir del asistente para administración de zonas de *Autodesk Ecotect Analysis*.

- Condiciones internas de diseño: Los parámetros relacionados con las condiciones internas de diseño son ropa, humedad y velocidad de aire. Cada uno de los parámetros tiene asignado un valor dependiendo de las características que representan las ganancias térmicas que aportan los diferentes parámetros mencionados para esta clasificación.
 - Ocupación: Estos parámetros se usan para cuantificar las ganancias de calor que aportan las personas dentro de la zona, dependiendo de la actividad que realicen [11].
 - Ganancias internas: El valor que define este parámetro está determinado por la suma de las ganancias de calor producidas por la iluminación y por otros equipos dentro de la zona, expresada en W/m^2 .
 - Tasa de intercambio de aire: Se define como la tasa de renovaciones de aire de una zona de acuerdo a la hermeticidad de la fachada del edificio. De acuerdo a las características constructivas de la edificación, este valor puede variar entre 0,25 a 2 dependiendo si es hermética o agujerada, respectivamente.
 - Tipo de sistema de climatización: Entre los sistemas de climatización que *Autodesk Ecotect Analysis* permite seleccionar se encuentran ventilación natural, sistema de modo combinado, aire acondicionado, solo calefacción o solo refrigeración. Este parámetro es asignado para cada zona dependiendo de las características que presente.
- Construcción del edificio: Es el conjunto de parámetros que define la estructura de la edificación. Los parámetros relacionados a esta categoría son la geometría del edificio y las propiedades térmicas de los materiales de construcción.

2.3.2.2. Selección de parámetros de desempeño

Debido a que el cuerpo humano es muy sensible a los cambios de temperatura, inclusive cuando son de alrededor de $1^{\circ}C$, la zona confort se define con un rango bajo permitido ($23^{\circ}C$ a $27^{\circ}C$) y se toma la decisión de establecer un error máximo del 10% entre los resultados predichos por simulación y los resultados obtenidos en sitio.

2.3.2.3. Simulaciones iniciales

Se ejecutan los diferentes análisis con el modelo aun sin calibrar con el fin de tener resultados iniciales y una base de datos para empezar a estudiar el comportamiento del modelo y las predicciones que genera para cada zona especificada. Para la posterior comparación con los datos recolectados en sitio, es necesario exportar los resultados a un formato común. El formato escogido fue .xls de MS Excel.

2.3.2.4. Muestreo en sitio

Observando los resultados de las simulaciones e identificando las variables que se obtienen de éstos, se procede a realizar un formato de adquisición de datos y su posterior recolección. Debido a la disponibilidad de equipos, tiempo, permiso y el tiempo que lleva en adecuarse los instrumentos, el periodo seleccionado es de un día comprendido entre las horas 9:00 am hasta las 18:00 pm.

Los instrumentos utilizados son:

- Termo-higrómetro: Instrumento utilizado para obtener los datos de temperatura interna de la zona de estudio y la humedad relativa de la misma. Con este fin, el dispositivo se ubicó en un lugar central dentro de la zona estudiada.
- Luxómetro: La cantidad de lúxes es uno de los datos de entrada al modelo luego se hizo un muestreo de la siguiente forma:
 - Se escogieron de 3 puntos específicos dentro de la zona para realizar allí la medición de nivel de iluminación.
 - Se tomaron las primeras medidas y en un intervalo de tiempo de 10 minutos se realizaron nuevamente las medidas en los puntos especificados.
 - Se calculó un promedio de las medidas y este se tomó como el dato de entrada al modelo virtual.
- Computador portátil: Se utilizó para el registro de las medidas obtenidas por los dos instrumentos anteriores y su posterior análisis.

2.3.2.5. Medición de parámetros de desempeño

Luego de las simulaciones iniciales, se procede a la comparación de los dos tipos de datos (virtuales y físicos) y a la verificación del cumplimiento de los parámetros de desempeño seleccionados. Con este objetivo se hace necesario exportar los

datos desde *Ecotect* a una hoja de cálculo en Excel y allí realizar el análisis de los resultados.

2.3.2.6. Ajuste de parámetros de entrada del modelo:

Teniendo los resultados de la comparación se toma la decisión de ajustar, o no, los datos de entrada al modelo, con el fin de obtener una representación válida del comportamiento real del edificio estudiado.

2.3.2.7. Realimentación

Después de haber ajustado los datos de entrada al modelo virtual, se debe repetir el procedimiento desde el numeral tres las veces que sea necesario para que cumpla con los parámetros de desempeño seleccionados. De esta forma se logra un ciclo cerrado para la continua mejora del modelo virtual.

A continuación se muestra la Tabla 4, utilizada como formato para la recolección de datos en sitio.

FECHA	HORA	CLIMA	TEMPERATURA	HUMEDAD	OCUPACIÓN	OBSERVACIONES
Martes, 12 de febrero de 2013	10:00	Soleado, cielo despejado	26,8	66%	Nula	Las medidas se realizaron con las ventanas abiertas. Ventilación cruzada
	10:30	Soleado, cielo despejado	26,3	66%	Nula	
	11:00	Soleado, cielo despejado	26,1	65%	Nula	
	11:30	Soleado, cielo despejado	26,1	64%	Nula	
	12:00	Soleado, cielo despejado	26,3	63%	Nula	
	15:00	Soleado, cielo despejado	27,9	57%	Nula	
	15:30	Soleado, cielo despejado	26,8	58%	Nula	
	16:00	Soleado, cielo despejado	26,3	61%	Nula	
	16:30	Soleado, cielo despejado	26,0	63%	Nula	
	17:00	Soleado con nubes	25,6	64%	Nula	
	17:30	Soleado con nubes	25,3	66%	Nula	
18:00	Soleado con nubes	25,2	68%	Nula		

Tabla 4 Formato para la recolección de datos en sitio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. S. Westphal and R. Lamberts, "BUILDING SIMULATION CALIBRATION USING SENSITIVITY ANALYSIS" Energy Efficiency in Buildings Laboratory (LabEEE) Federal University of Santa Catarina (UFSC) Florianópolis - Santa Catarina - Brazil, pp. 1331–1338, 2005.
- [2] R. S. Srinivasan, J. Lakshmanan, and D. Srivastav, "CALIBRATED SIMULATION OF AN EXISTING CONVENTION CENTER : THE ROLE OF EVENT CALENDAR AND ENERGY MODELING SOFTWARE" pp. 14–16, 2011.
- [3] P. Raftery, M. Keane, and A. Costa, "CALIBRATION OF A DETAILED SIMULATION MODEL TO ENERGY MONITORING SYSTEM DATA : A METHODOLOGY AND CASE STUDY," in *Eleventh International IBPSA Conference*, 2009, pp. 1199–1206.
- [4] A. Mahdavi, K. Orehounig, N. Mikats, L. Lambeva, and A. El-habashi, "ANALYZING TRADITIONAL BUILDINGS VIA EMPIRICALLY CALIBRATED BUILDING PERFORMANCE MODELS" Department of Building Physics and Building Ecology , Vienna University of Technology , Faculty of Architecture , University of Monofiya , Egypt, 2007.
- [5] P. E. D. Love, D. J. Edwards, S. Han, and Y. M. Goh, "Design error reduction: toward the effective utilization of building information modeling," *Research in Engineering Design*, vol. 22, no. 3, pp. 173–187, Mar. 2011.
- [6] Prácticas de Laboratorio: Física Hernández et al. 2005, "Tratamiento de datos experimentales. Teoría de errores," en *Prácticas de laboratorio; departamento de optica; Universidad de Granada*, 2005, pp. 103–116.
- [7] Khaled Nassar. Ph.D AIA, "The Effect of Building Information Modeling on the Accuracy of Estimates," 2007.
- [8] A. Carrillo, F. Dominguez, and J. M. Cejudo, "CALIBRATION OF AN ENERGYPLUS SIMULATION MODEL BY THE STEM- PSTAR METHOD," no. 1993, pp. 2043–2050, 2009.
- [9] D. Tarlow, A. Peterman, B. R. Schwegler, and C. Trigg, "AUTOMATICALLY CALIBRATING A PROBABILISTIC GRAPHICAL MODEL OF BUILDING ENERGY CONSUMPTION" Department of Computer Science , University of Toronto , Canada Center for Integrated Facility Engineering , Stanford University, pp. 904–911, 2009.
- [10] S. Liu and G. P. Henze, "CALIBRATION OF BUILDING MODELS FOR SUPERVISORY CONTROL," *Ninth International IBPSA Conference*, pp. 641–648, 2005.
- [11] Autodesk, Inc. Help Ecotect 2011. 2010.

3. AJUSTE DEL MODELO

El ajuste del modelo se hace con base en la metodología expuesta en el capítulo 2. El software *Autodesk Ecotect Analysis* permite ajustar una serie de parámetros de manera tal que las simulaciones del modelo virtual reflejen el comportamiento real de la edificación. Al modificar los parámetros permitidos se busca que el comportamiento virtual y real difiera en un porcentaje no mayor al 10%. Este porcentaje de error se considera admisible para este tipo de comparaciones.

Entre los parámetros a modificar en el modelo virtual se identifican dos categorías: ganancias de calor interna y construcción del edificio. Los primeros hacen referencia a las condiciones de operación del lugar y los segundos están relacionados con los materiales y las dimensiones de la edificación. Cada una de estas variables será ajustada para posteriormente simular la temperatura interna del lugar y compararla con las mediciones realizadas en sitio de manera que la diferencia entre las temperaturas sea mínima.

3.1. GANANCIAS DE CALOR INTERNA

Para efectos prácticos, los resultados que se exponen en el desarrollo de este inciso son los obtenidos para el análisis de la zona que representa el salón 515. En el Anexo B se encuentran los demás resultados obtenidos para las diferentes zonas analizadas. En la Tabla 5. se presentan los datos de temperatura tomados en sitio.

FECHA	HORA	CLIMA	TEMPERATURA [°C]	HUMEDAD [%]
viernes, 08 de marzo de 2013	09:00	Soleado, cielo despejado	27,0	64%
	10:00	Soleado, cielo despejado	27,2	67%
	11:00	Soleado, cielo despejado	27,7	65%
	12:00	Soleado, cielo despejado	27,5	70%
	13:00	poca nubosidad	27,7	70%
	14:00	Soleado, cielo despejado	27,4	72%
	15:00	Soleado, cielo despejado	27,4	73%
	16:00	poca nubosidad	26,7	76%
	17:00	Nubes	26,3	79%
	18:00	poca nubosidad	26,3	79%
		Promedio	27,12	72%

Tabla 5. Datos recolectados en el aula 515

Al comparar la temperatura real con la que arroja el programa para el mismo día en que se realizó la medición en la zona, se notó una diferencia significativa entre los dos tipos de datos con un error porcentual máximo del 11,1%. Estos resultados se pueden observar en la Figura 14 y en la Tabla 6.

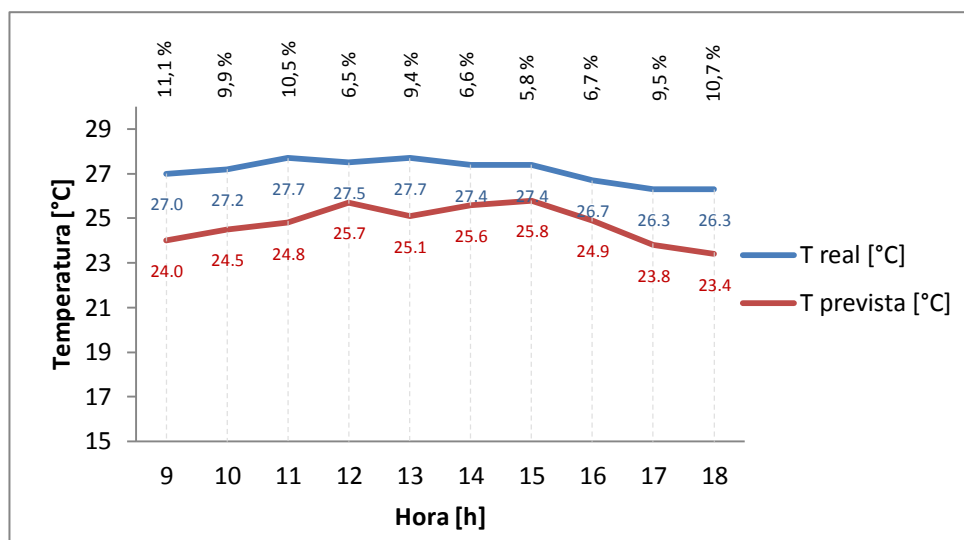


Figura 14. Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según *Ecotect* (azul) para el modelo aún sin ajustar

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	24,0	27,0	11,1
10	24,5	27,2	9,9
11	24,8	27,7	10,5
12	25,7	27,5	6,5
13	25,1	27,7	9,4
14	25,6	27,4	6,6
15	25,8	27,4	5,8
16	24,9	26,7	6,7
17	23,8	26,3	9,5
18	23,4	26,2	10,7
Error máximo			11,1

Tabla 6. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo aún sin ajustar

En el momento de la recolección de datos en sitio, se pudo observar que la información prevista desde el diseño, para el uso final de cada una de las zonas a estudiar, difería en buena parte del uso real que tenía los lugares específicos.

De esta forma se procede a realizar un análisis de los parámetros básicos y su posterior ajuste a las condiciones reales para generar nuevos resultados de simulación y su consecuente verificación de desempeño. En la Figura 15. se muestran los parámetros de entrada supuestos en el proceso de diseño y en la Figura 16. se aprecia los valores modificados a la situación real.

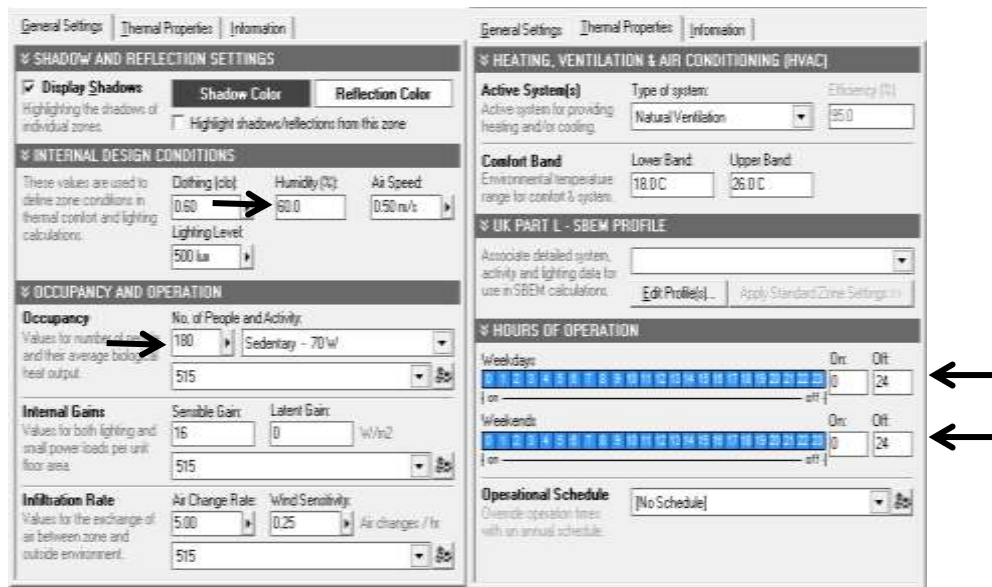


Figura 15. Parámetros básicos de entrada del modelo sin ajustar

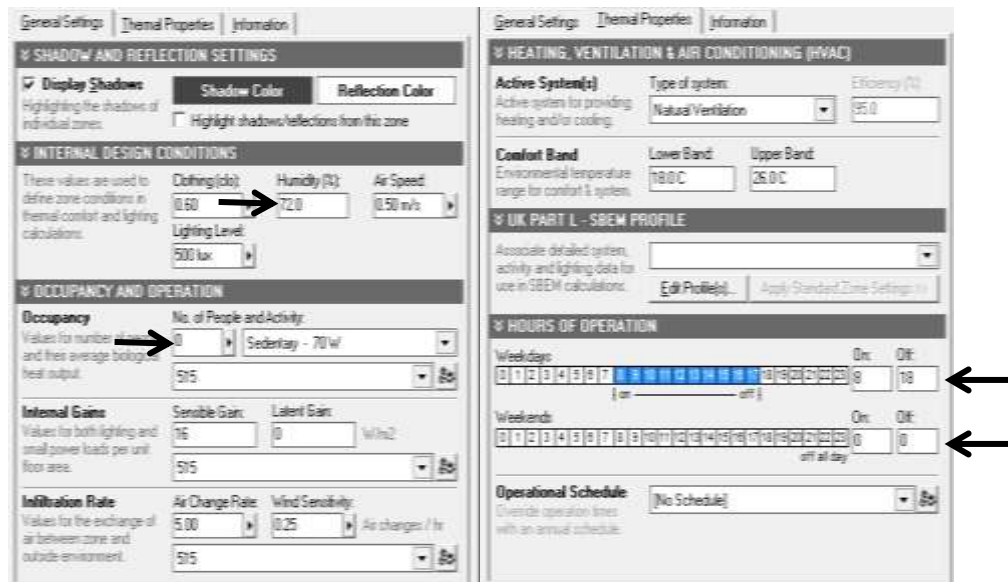


Figura 16. Parámetros básicos ajustados a las condiciones reales del edificio

Al modificar los parámetros concernientes a las condiciones de operación se observó que para esta aula en particular, los ajustes relacionados con la

humedad y la ocupación no presentan mayores repercusiones en el comportamiento de la temperatura interna de zona. De modo contrario, se observó que el ajuste relacionado con las ganancias internas tiene un efecto considerable en la variación de la temperatura de la zona estudiada.

Al simular bajo las nuevas condiciones se encontró que para esta zona los valores de temperatura interna permanecieron igual, es decir aún el error máximo entre temperaturas es del 11,1%

Dado que el error permanece igual se sugiere revisar otros parámetros. Siguiendo en la categoría de parámetros básicos, se revisó en el archivo de datos climáticos disponibles las condiciones atmosféricas para el día 8 de marzo, estas se pueden apreciar en la Figura 17. Se observó que la información recolectada en el 2011 difiere a las condiciones observadas el día de las mediciones en sitio tomadas este mismo día en el año 2013.

Debido a que no se pudo contar con los datos actualizados a la fecha, la solución es encontrar, en el archivo climático disponible, un día que presente condiciones atmosféricas similares al día en que se realizó el muestreo en sitio. Este proceso se llevó a cabo por medio del programa complemento de *Ecotect, Weather Tool*.

Teniendo en cuenta los registros de los datos históricos obtenidos del IDEAM relacionados con la temperatura máxima y mínima de cada día, se encontró que el día que mejor cumple con las condiciones es el 30 de enero de 2011. La gráfica que muestra la tendencia climática para este día se muestra en la Figura 18.

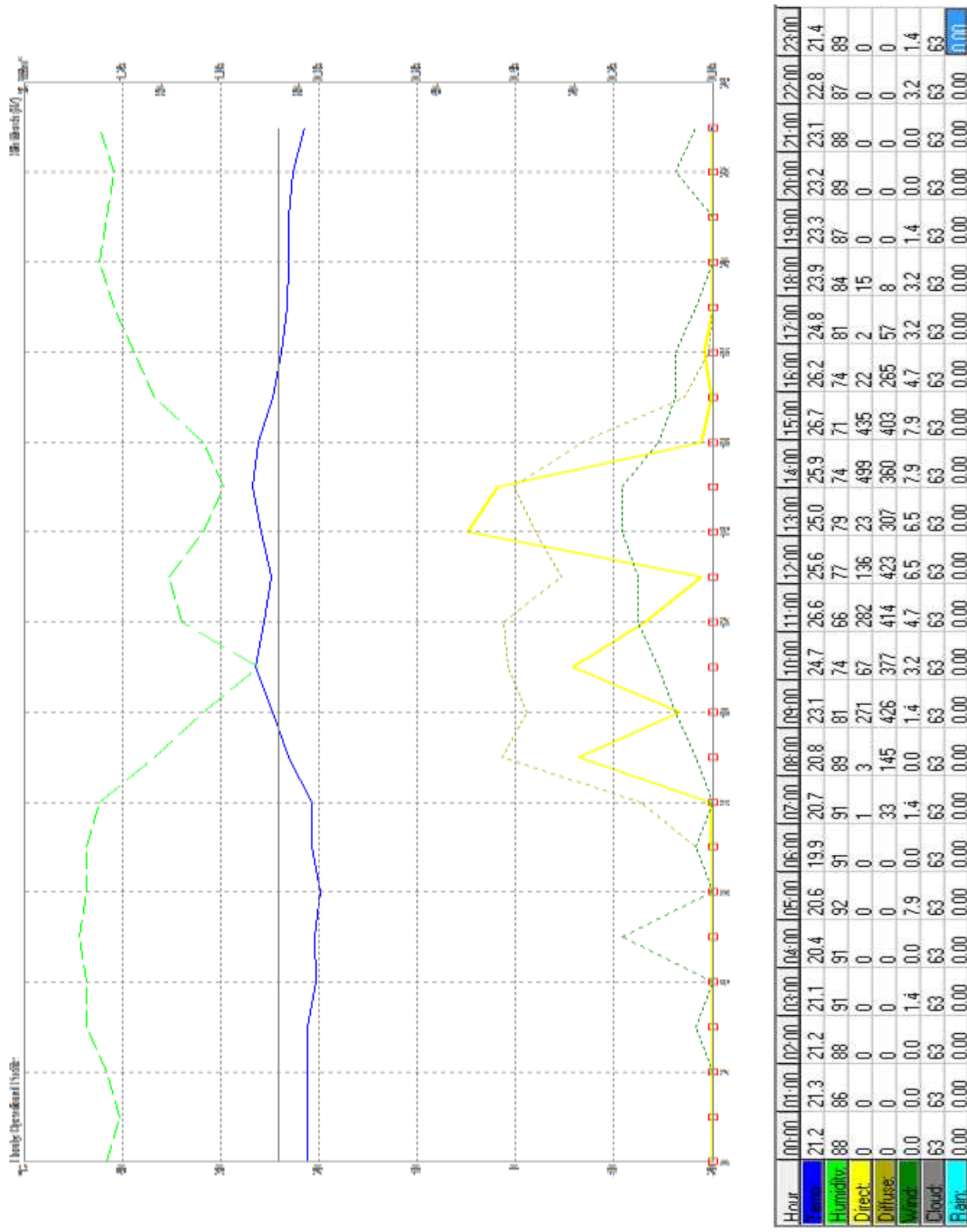


Figura 17. Condiciones climáticas del 30 de enero de 2011, similares al 9 de marzo del 2013

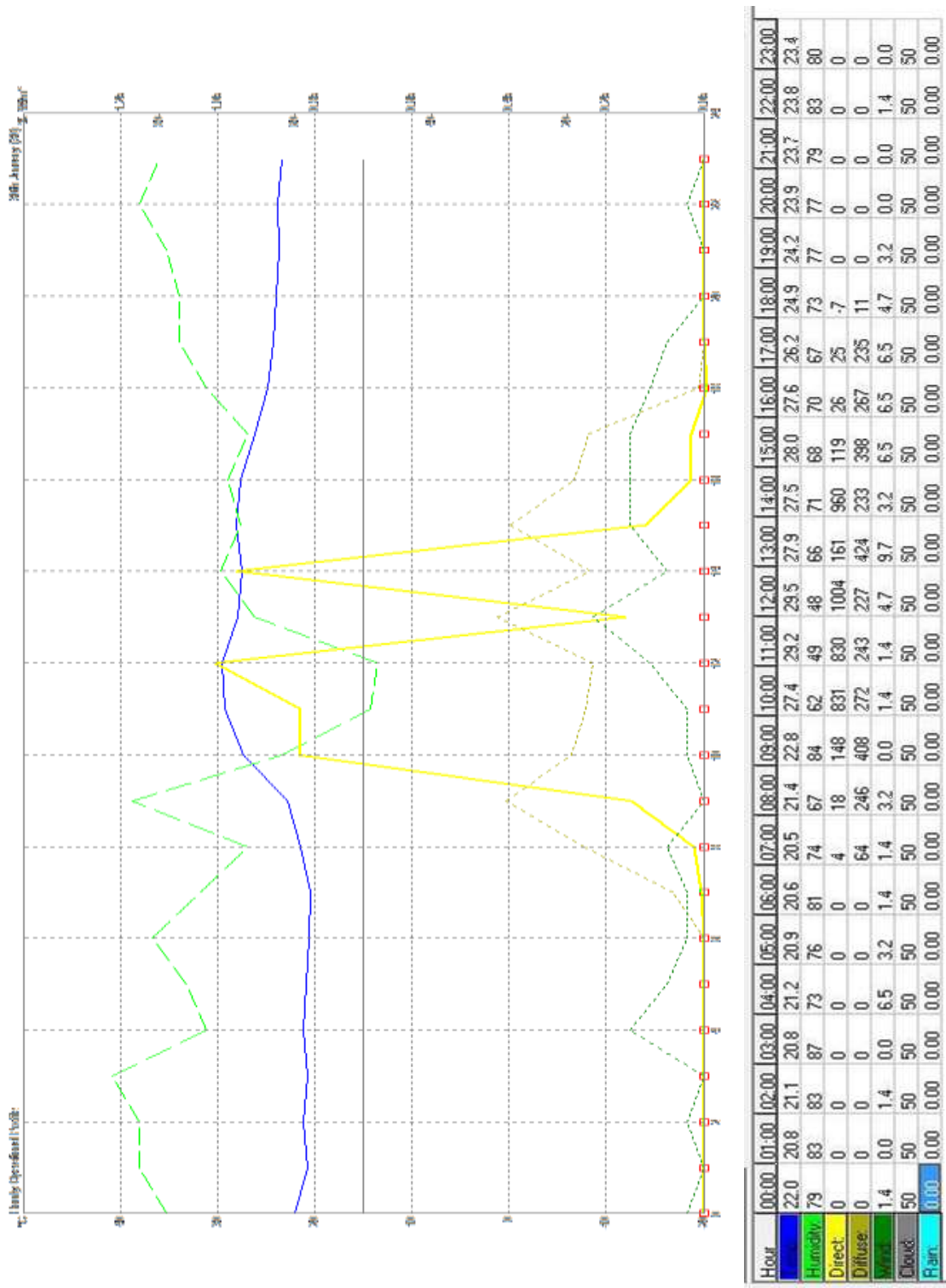


Figura18. Condiciones climáticas 8 de marzo del 2011

Luego de esta modificación se logró reducir el error máximo desde el 11,1% al 10,1% en el aula especificada. Los resultados se aprecian en la Tabla 7 y la Figura 19.

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	24,7	27,0	8,5
10	24,6	27,2	9,6
11	24,9	27,7	10,1
12	25,3	27,5	8,0
13	26,4	27,7	4,7
14	25,7	27,4	6,2
15	26,4	27,4	3,6
16	26,1	26,7	2,2
17	25,4	26,3	3,4
18	24,4	26,2	6,9
Error máximo			10,1

Tabla 7. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo, ajustando condiciones climáticas.

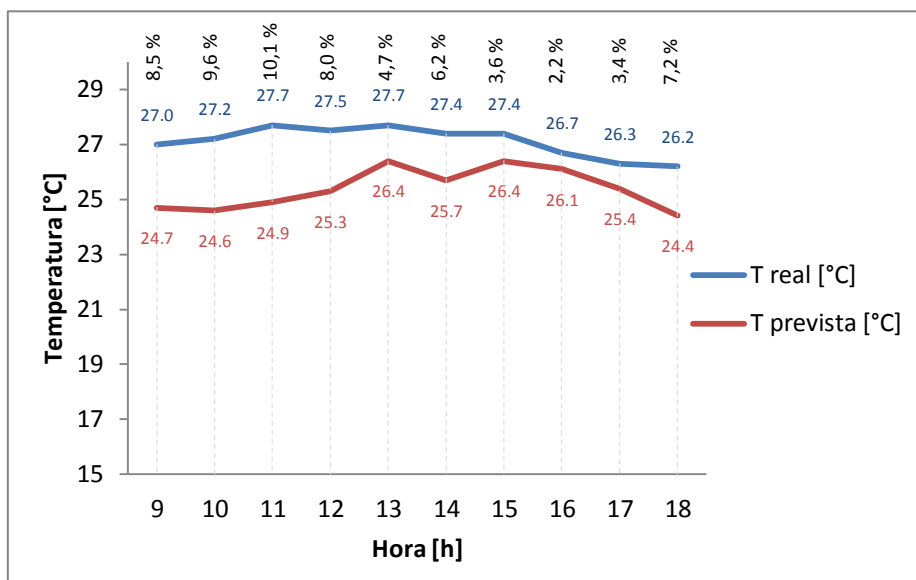


Figura 19. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo, ajustando condiciones climáticas.

Aunque al modificar los parámetros básicos se consiguió llegar a un error cercano al admisible se procede a realizar la verificación de los parámetros estructurales.

3.2. CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO

Los ajustes relacionados con la construcción del edificio hacen referencia a la verificación y modificación de las dimensiones y características térmicas de los elementos constructivos.

3.2.1. Características térmicas

Autodesk Ecotect Analysis dispone de una librería donde se encuentran definidas la mayoría de las propiedades térmicas para cada uno de los materiales. Solo una de las propiedades, la constante de retraso térmico, no es calculada por el programa y debe ser definida independientemente.

Con base en el pliego de condiciones de especificaciones técnicas disponible en la página virtual de la Universidad Industrial de Santander fueron asignados los materiales para cada elemento del EEEIE.

Para determinar la constante de retraso térmico se empleó el programa *Ecomat* el cuál es una extensión de *Ecotect* diseñado específicamente para determinar las características térmicas de los diferentes elementos constructivos utilizados en el modelo. Dichas constantes fueron modificadas y ajustadas. Estas modificaciones se encuentran registradas en el ANEXO C.

Una vez realizado dicho ajuste, se simuló nuevamente el comportamiento térmico de la edificación y se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 8. y en la Figura 20.

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	25,3	27,0	6,3
10	25,3	27,2	7,0
11	25,7	27,7	7,2
12	26,0	27,5	5,5
13	27,2	27,7	1,8
14	26,6	27,4	2,9
15	27,1	27,4	1,1
16	27,0	26,7	1,1
17	26,1	26,3	0,8
18	25,0	26,2	4,9
Error máximo			7,2

Tabla 8. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo, ajustando las propiedades térmicas de los materiales de construcción.

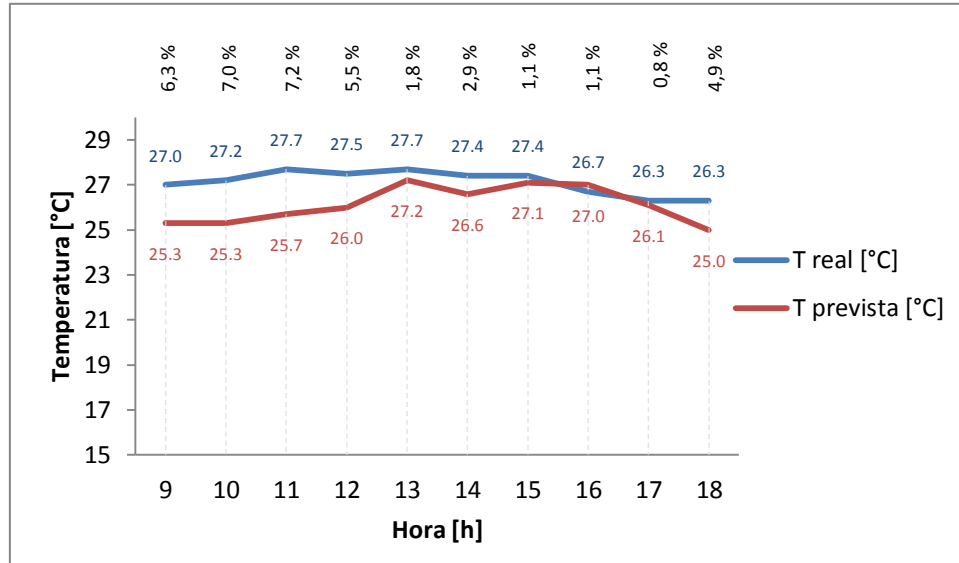


Figura 20. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo, ajustando las propiedades térmicas de los materiales de construcción

3.2.2. Disposición física

A pesar de que el error se encuentra entre los límites escogidos, se pudo observar que las especificaciones de los muros no son precisas en el modelo. Por medio de los planos finales del edificio, facilitados por planta física, y las visitas de observación se verificaron las dimensiones y la disposición física que posee el edificio. Esto con el fin de darle mayor veracidad al modelo. De este proceso surgieron varias modificaciones las cuales se encuentran registradas en el ANEXO C.

En el caso particular del aula 515 se modifica los muros orientales y se ajusta el material principal y alterno definidos para éstos en el modelo inicial. Los resultados obtenidos para estos ajustes se presentan en la Tabla 9 y la Figura 21.

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	25,6	27,0	5,2
10	25,4	27,2	6,6
11	26,1	27,7	5,8
12	26,9	27,5	2,2
13	27,8	27,7	0,4
14	27,1	27,4	1,1
15	27,7	27,4	1,1
16	27,9	26,7	4,5

17	26,7	26,3	1,5
18	26,2	26,3	0,4
Error máximo			6,6

Tabla 9. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según Ecotect para el modelo, ajustando las propiedades térmicas y disposición física de los elementos constructivos

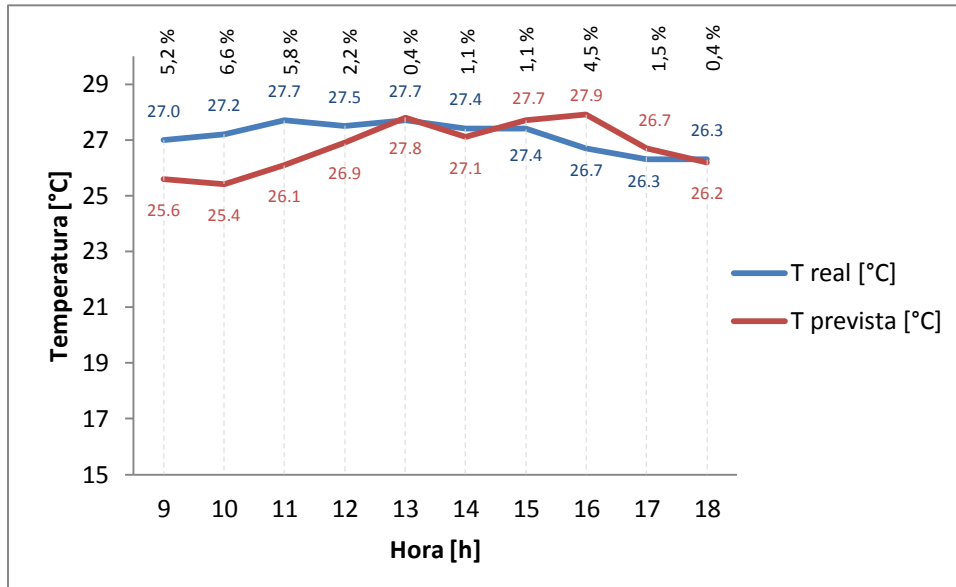


Figura 21 Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según Ecotect para el modelo, ajustando las propiedades térmicas y disposición física de los elementos constructivos

Finalmente, se logró obtener un error máximo del 6,6% y un error promedio del 2,9% entre la simulación del comportamiento del BIM y el desempeño real del EEEIE. En la Figura 22 se puede observar la comparación de la temperatura interna de la zona para el modelo antes de ajustar, con el modelo ajustado y con las mediciones realizadas en sitio.

Como se mencionó anteriormente, el mismo procedimiento fue llevado a cabo para las demás zonas críticas del modelo. Los resultados para cada una de ellas se exponen en el Anexo B.

Al obtener un error menor del 10% para las zonas se puede asegurar que el modelo ha sido correctamente calibrado.

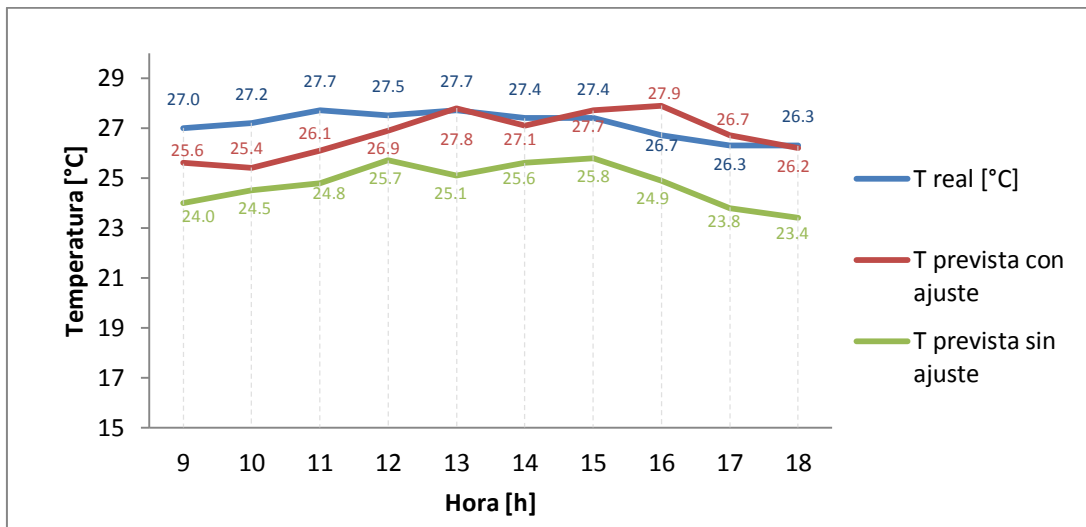


Figura 22. Comparación entre la temperatura medida en sitio, la temperatura interna con el modelo sin calibrar y la temperatura para el modelo calibrado

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo de la calibración del modelo virtual. Se exponen los pasos para ser considerados en futuros trabajos de análisis similares al desarrollado en este proyecto.

El trabajo realizado busca como objetivo principal la calibración del modelo virtual del EEEIE. Para su desarrollo se partió por la selección del método de calibración apropiado, determinar el proceso de monitorización de variables micro-climáticas de espacios interiores y finalmente ajustar el modelo con base en las mediciones realizadas en sitio.

En cumplimiento con el primer objetivo específico planteado, el método de calibración del modelo virtual fue seleccionado basándose en criterios de disponibilidad de tiempo, presupuesto y disponibilidad de recursos. Se optó por el método de calibración empírica modificado, dado que era el que mejor se ajustaba a las condiciones presentes durante el desarrollo del trabajo.

La metodología fue llevada a cabo en 5 pasos

1. Identificación de los datos de entrada del modelo
2. Selección de parámetros de desempeño
3. Simulaciones iniciales
4. Muestreo en sitio
5. Medición de parámetros de desempeño
6. Ajuste de parámetros de entrada del modelo
7. Realimentación

En este punto, se hace énfasis en que el grado de exactitud y precisión al que un modelo puede ser ajustado depende de la información disponible para el calibrador, la posibilidad de modificación de cada aspecto influyente en la caracterización de los materiales, el ajuste a las condiciones reales de operación del edificio y la precisión con que el software puede modelar el comportamiento de la edificación.

Al simular el comportamiento del edificio se identificaron inconvenientes. Uno de ellos corresponde al hecho de no contar con los datos meteorológicos actualizados de los días en que se realizaron las mediciones en sitio. Esto se resolvió buscando en el IDEAM registros históricos del valor máximo y mínimo de temperatura para el día en particular y comparando con las observaciones de las variables cualitativas que se hicieron del clima para ese día. Con base en estos parámetros se buscó en el archivo meteorológico disponible para Bucaramanga de los años 2010 y 2011 y se seleccionó el día que presentara un comportamiento similar al momento que se realizaron los muestreos.

Otro aspecto importante que se concluyó a partir de las simulaciones de las zonas críticas es que no basta con modificar los parámetros únicamente de dichas zonas, sino que, además estos se deben verificar para cada una de las zonas del modelo. Por medio de esa verificación se pudo observar que, en algunas zonas, el modelado arquitectónico y estructural no estaba bien definido, y estas diferencias incidían en los resultados de las simulaciones. Por este motivo, para proyectos similares, se sugiere replantear este enfoque, llevando el análisis a nivel de mayor detalle y de esta forma se tenga una mejor apreciación del estado actual del modelo.

En consecuencia, si bien se siguen presentando fuentes de error y no era recomendable usar el consumo energético de la edificación como un indicador en el proceso de calibración, se logró, mediante la modificación de las condiciones de operación y los parámetros estructurales, llegar a un error máximo menor al 10% relacionado con el comportamiento térmico del edificio, el cual se puede admitir y determinar que la edificación ha sido calibrada.

El consumo energético no debía ser usado como parámetro de evaluación debido a que la demanda eléctrica requerida por el sistema de aire acondicionado depende directamente de las condiciones climáticas presentes durante la prestación del servicio. Dado que no se tenía datos climáticos actualizados, esto incluiría una nueva fuente de error. Adicionalmente, como el análisis se realizó por zonas no se contaba con una discriminación del consumo de este servicio con en el nivel requerido.

Durante el desarrollo de este proyecto, se ha encontrado que el proceso de parametrización del software y el ajuste de un modelo depende, en gran medida, de las observaciones y esquemas de las condiciones reales constructivas obtenidos por el encargado de realizar esta operación. Debido

a esto es recomendable generar un registro de las modificaciones realizadas a los parámetros dejando evidencia experimental o documental de este proceso de tal forma que se pueda realizar un seguimiento preciso a estos. En este libro se presenta el formato utilizado para el registro de cambios en el Anexo C.

Con este trabajo de grado se expone un proceso sistemático encaminado a obtener, analizar y simular los datos de desempeño de un edificio tradicional. Así mismo, se demostró cómo un modelo digital de una construcción es generado y calibrado a partir de la documentación de la edificación (geometría, construcción, sistemas, operación), monitorización de las condiciones climáticas adentro y fuera del edificio, y simulaciones del comportamiento de éste.

Adicionalmente, debido a que este proyecto macro se realizó con miras a promover políticas de uso racional de la energía y cuidado del medio ambiente, se recomienda actualizar el sistema de control de los aires acondicionados o implementar políticas que permitan una optimización en la utilización de este servicio. Esto se menciona ya que se conocieron casos donde los usuarios estaban disconformes con la temperatura y otros en los que estos equipos fueron mal empleados debido a no tener acceso al control del mismo.

Por último, al desarrollar este proyecto se pudo apreciar la importancia que tiene el hacer un análisis energético a las edificaciones en su etapa de diseño o en la planeación de modificaciones futuras, si es el caso de un edificio ya construido. Se recomienda dicho análisis con el propósito de optimizar los costos de operación, evitar inconvenientes técnicos analizando todos los posibles escenarios, de manera que no se incurra en adiciones al presupuesto una vez el proyecto esté en marcha.

1. ANEXO A. *Autodesk Ecotect Analysis*

La construcción de edificaciones amigables con el medio ambiente, en la actualidad, más que una opción, se ha convertido en una necesidad [1]. Uno de los aspectos primordiales a evaluar para considerar una edificación sostenible es el uso eficiente de la energía, mediante el aprovechamiento de las condiciones naturales que ofrece el entorno. Además de conseguir una construcción amigable con el medio ambiente, se debe garantizar el confort para sus usuarios.

Con el fin de evaluar todo este tipo de aspectos, se han diseñado varios softwares que permiten realizar diferentes tipos de simulaciones para obtener una edificación con un rendimiento óptimo.

Autodesk Ecotect Analysis es un software perteneciente a Autodesk, Inc. desde el 2008. Fue creado para la simulación y análisis de ideas para edificaciones con principios de sostenibilidad energética aprovechando su entorno y sus condiciones ambientales. Esto se puede lograr gracias a las herramientas arquitectónicas, de diseño y servicio web que brinda este programa [2].

Una de las grandes ventajas de la simulación por software es que permite integrar los diferentes tipos de factores que influyen en una edificación. Entre las herramientas que *Autodesk Ecotect Analysis* ofrece, está la capacidad de hacer un análisis de iluminación, temperatura, ventilación, acústico entre otras.

Este tipo de análisis es fundamental, dado que permite hacer una aproximación de cómo se puede comportar un diseño bajo diferentes tipos de condiciones, lo cual ayuda a tomar acciones correctivas o permite realizar mejoras en el desarrollo de la idea en cuestión. Con base en estos resultados, se pueden hacer las remodelaciones para lograr una construcción más eficiente energéticamente; y a su vez, ofrezca un mayor confort a los usuarios [3].

Al modelar y hacer un análisis energético de una edificación, es necesario tener varios factores en cuenta como:

- Área expuesta al exterior.
- Área expuesta a la radiación solar.
- Aberturas existentes, tamaño y orientación en cada espacio.

- Calor producido por la iluminación y equipos internos.

Esta información es necesaria para lograr hacer una simulación del movimiento energético: si la energía va entrando, saliendo o pasando a través de los diferentes lugares al interior de la edificación.

Al adquirir el software, se puede acceder al servicio web " *Green Building Studio web-based service*" que tiene la capacidad de analizar el consumo de energía, de agua y de las emisiones de carbono.

Ello permite a arquitectos e ingenieros proponer alternativas enfocadas a la construcción de una edificación sostenible, reduciendo el consumo de los factores anteriormente mencionados mediante el aprovechamiento del entorno en el que se desarrollará la construcción [1].

El entorno visual ofrecido por el software es bastante útil porque muestra de manera gráfica la influencia de las diferentes condiciones ambientales, realizando simulaciones para diferentes horas del día y épocas del año, permitiendo visualizar interactivamente cómo podrían impactar en la edificación [4]; lo cual favorece la selección correcta de materiales de construcción; a su vez, en edificaciones existentes, permite identificar potenciales factores que influyen en el bajo rendimiento de la construcción[5].

Autodesk Ecotect Analysis es una herramienta bastante robusta para el análisis de diseños que cumplan con altos niveles de rendimiento energético. A continuación se hará un breve recorrido por las diferentes tipos de herramientas que el software ofrece.

2. Diseño de iluminación

El cálculo de iluminación, realizado por ECOTECT, se puede hacer por medio de dos métodos: el análisis de red o análisis por puntos. Independientemente de los métodos, se escoge el área a evaluar y se ubica la red o los puntos a la altura en la cual se quieran evaluar los niveles de iluminación.

Es posible especificar el nivel de precisión con el cual se desean obtener los resultados, pero hay que tener en cuenta que a mayor precisión, mayor es el tiempo de procesamiento de los cálculos. Los métodos se basan en calcular la suma de las contribuciones de todas las fuentes de luz en cada punto de medida, y no se tiene en cuenta la contribución de luz difusa [6].

Debido a que en espacios interiores también tiene incidencia la iluminación natural, se debe suministrar al programa una estimación del

comportamiento climático, de manera que se permita comparar el aporte de luz natural y artificial por separado o en conjunto.

Una vez suministrada la información necesaria, ECOTECH arroja resultados con referencia a:

- Nivel de iluminación natural: Cantidad de luz disponible por fuentes naturales
- Nivel de iluminación eléctrica: Cantidad de luz disponible por fuentes artificiales
- Nivel de iluminación total: Considera la cantidad de luz disponible tanto por fuentes naturales como artificiales

3. Análisis acústico de espacios interiores

El análisis acústico se realiza con el fin de diseñar adecuadamente lugares como auditorios o salas de teatro para que el sonido no tenga efectos de reverberación o eco y se garantice confort para los ocupantes en este aspecto.

ECOTECH permite generar y mostrar rayos acústicos y partículas en un modelo, partiendo de una selección previa del área objetivo. Una vez localizada, se posiciona la fuente de sonido en un lugar determinado y se indican las superficies reflejantes que encierran el sonido. Mediante una animación que muestra la trayectoria de los rayos del sonido al mover la fuente emisora, se puede analizar los efectos que el sonido genera en el lugar [7].

Para el cálculo de la incidencia de los fenómenos asociados a la propagación del sonido, el software hace uso de tres tipos de algoritmos que el usuario puede escoger; Sabine, Norris-Eyring y Millington-Sette, dependiendo del análisis que se desee [8].

4. Análisis de flujo de aire y ventilación

Aunque ECOTECH no tiene una herramienta que permita realizar un análisis de flujo de aire y ventilación, si tiene la capacidad de mostrar estos resultados importando el archivo de otro programa CAD. La ventaja que ofrece es poder integrar todos los tipos de análisis en un mismo modelo. El flujo de aire y ventilación son aspectos que van a influir directamente en la eficiencia energética al garantizar un confort térmico a los ocupantes proporcionado por una fuente natural [9].

5. Análisis solar

Al estudiar los efectos que tiene el sol sobre el diseño se pueden definir algunos aspectos para colaborar con el diseño sostenible. Esto se hace básicamente por dos métodos, el estudio de sombreado y el estudio de la radiación solar.

Con estos dos análisis se puede lograr ubicar la edificación para aprovechar, por ejemplo, el calor brindado por el sol para mantener la estructura confortable durante el invierno (en caso de que haya estaciones). Por medio del estudio de sombreado se puede verificar qué áreas van a tener mejor iluminación tanto en el exterior como en zonas internas. Con el análisis de la radiación solar se podría definir en qué lugares se puede ubicar paneles solares para una mejor captación de energía [10].

La descripción del escenario debe tener el lugar donde se planea o está ubicada la edificación (longitud, latitud y zona horaria), la fecha y la hora para la cual se desea observar el comportamiento (hora, día y Mes). Esto debido a que la posición del sol, sus efectos y las condiciones climáticas varían considerablemente de acuerdo a las diferentes localizaciones alrededor del mundo [10].

Existen diferentes formas de ajustar la localización, algunas de las cuales son:

- Librerías de *Ecotect Analysis* o agregadas.
- Por medio de servicios web como *Google Maps*
- De forma manual, cuando la persona proporciona los datos necesarios.

Para este análisis, Ecotect se basa en el método “*Chartered Institute of Building Services Engineers (CIBSE) Admittance Method*”, el cual es utilizado para determinar las temperaturas internas y las descargas de calor. El funcionamiento de este método radica en el concepto de que la temperatura interna de cualquier edificación siempre tenderá a la temperatura media del ambiente externo y que varían de manera cíclica. Una de sus características más destacadas es que no tiene restricciones en cuanto a la forma del diseño o a número de zonas térmicas que serán analizadas[11].

Para realizar este tipo de análisis es necesario dividir el modelo ECOTECT en zonas térmicas, las cuales determinan un volumen de aire cerrado, que representan una habitación o sala del diseño.

Entre los análisis térmicos se encuentra los siguientes ámbitos:

- Temperaturas horarias: Esta simulación calcula cómo responden las temperaturas de las zonas térmicas respecto a los cambios ambientales externos durante 24 horas [12].
- Ganancia y pérdidas de calor horarias: Las gráficas muestran las magnitudes de flujos de calor a través de las zonas durante las 24 horas de un día [13].
- Cargas de frío y calor: Son gráficas que dan una muestra de las cargas de calor o de enfriamiento que tendrá que soportar la estructura diseñada, permitiendo formar una idea del tipo de sistema de acondicionamiento más adecuado para el edificio [14].
- Distribución anual: Estas gráficas muestran, de acuerdo a datos estadísticos, cómo se comportan las temperaturas para cada una de las zonas durante un año [15].

REFERENCIAS

- [1] Autodesk.Inc, "Sustainable Design Analysis and Building Information Modeling." 2010.
- [2] Wikipedia, "Autodesk Ecotect Analysis," 2011. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Ecotect_Analysis. [Accessed: 12-Jun-2012].
- [3] Autodesk.Inc, "Autodesk Ecotect Analysis," *Sustainable Building Design Software*, 2012. [Online]. Available: <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>. [Accessed: 12-Jun-2012].
- [4] Autodesk.Inc, "Autodesk Ecotect Analysis 2010 Visualize Sustainable Design." 2010.
- [5] C. Gutierrez, "Ecotect: Software de Diseño de Construcción Sustentable," 2010. [Online]. Available: Gaston Herrea. [Accessed: 06-Jun-2012].
- [6] Natural Frequency, "ECOTECT TUTORIAL : CALCULATE ARTIFICIAL LIGHTING USING ANALYSIS GRID." [Online]. Available: http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Artificial_Levels_Grid. [Accessed: 18-Abr-2012].
- [7] Natural Frequency, "ECOTECT TUTORIAL : DISPLAYING ACOUSTIC RAYS." [Online]. Available: http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Ecotect_Acoustic_Rays. [Accessed: 18-Abr-2012].
- [8] Natural Frequency, "ECOTECT TUTORIALS : REVERBERATION TIME ALGORITHMS." [Online]. Available: http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Ecotect_RT_Selection. [Accessed: 19-Abr-2012].
- [9] Natural Frequency, "ECOTECT TUTORIAL: DISPLAY AIR FLOW VALUES." [Online]. Available: http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Display_Air_Flow. [Accessed: 19-Abr-2012].
- [10] Gaston Herrea, "CURSO DE ECOTECT 5 . 5 ARCHISOFT 2007 SESIÓN 2," 2007.
- [11] Autodesk Ecotect Analysis, "Autodesk Ecotect Help:The Thermal Simulation Engine." .
- [12] Autodesk Ecotect Analysis, "Autodesk Ecotect help:Hourly Temperatures." .
- [13] Autodesk Ecotect Analysis, "Autodesk Ecotect Help:Hourly Heat Gains." .
- [14] Autodesk Ecotect Analysis, "Autodesk Ecotect Help:Heating and Cooling Loads." .
- [15] Autodesk Ecotect Analysis, "Autodesk Ecotec Help: Annual Distributions." .

ANEXO B. Ajuste de puntos críticos del BIM

En el capítulo 3 se realizó el ajuste del aula 515 del EEEIE con base en la metodología propuesta en el capítulo 2. En este anexo se presenta el ajuste de los demás puntos críticos siguiendo el mismo esquema presentado en el capítulo 3.

1. Acceso principal

A continuación se presentan los pasos seguidos para ajustar la zona correspondiente al Acceso Principal.

1.1. Parámetros básicos

Los parámetros básicos hacen referencia a las mediciones realizadas en sitio. En la Tabla 10 se presentan los datos recolectados en sitio.

FECHA	HORA	CLIMA	TEMPERATURA	HUMEDAD
viernes, 01 de marzo de 2013	09:00	Nublado	24,7	79%
	10:00	Nublado	24,2	81%
	11:00	Nublado	24,7	82%
	12:00	Poco soleado y nublado	25,4	75%
	13:00	Nublado	25,1	75%
	14:00	Lluvia y sol	25,0	88%
	15:00	Nublado	25,0	86%
	16:00	Nublado	24,8	83%
	17:00	Nublado	24,7	85%
	18:00	Nublado	24,7	83%

Tabla 10. Datos recolectados en el acceso principal

1.2. Simulación sin ajustar

Antes de realizar algún ajuste se simuló la temperatura interna de la zona de manera que pudiera ser posteriormente comparado cuando se tuviera la zona ajustada. En la Tabla 11 y en la Figura 23 se presentan las condiciones del Acceso principal simulado en *Autodesk Ecotect Analysis* sin ajustar.

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	22,8	24,7	7,7
10	23,2	24,2	4,1
11	23,8	24,7	3,6
12	26,6	25,4	4,7
13	24,4	25,1	2,8
14	25,9	25,0	3,6
15	24,8	25,0	0,8
16	26,9	24,8	8,5
17	24,0	24,7	2,8
18	24,5	24,7	0,8
Error máximo			8,5

Tabla 11. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo aún sin ajustar en la zona del Acceso Principal

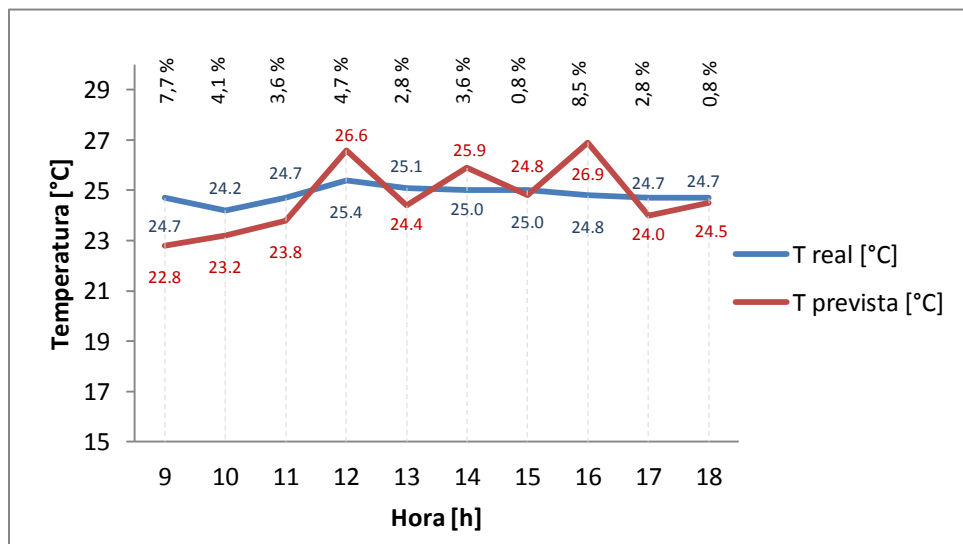


Figura 23. Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según *Ecotect* (azul) para el modelo sin ajustar

1.3. Ajuste de las condiciones de operación de la zona

Las condiciones de operación del Acceso principal fueron ajustadas según la ocupación para un día normal de trabajo como se muestra en la Figura 24.

En la Tabla 12 y la Figura 25. se presenta la comparación de la temperatura medida en sitio y la simulada por el software. Al realizar este ajuste se obtuvo un error máximo del 4,9%

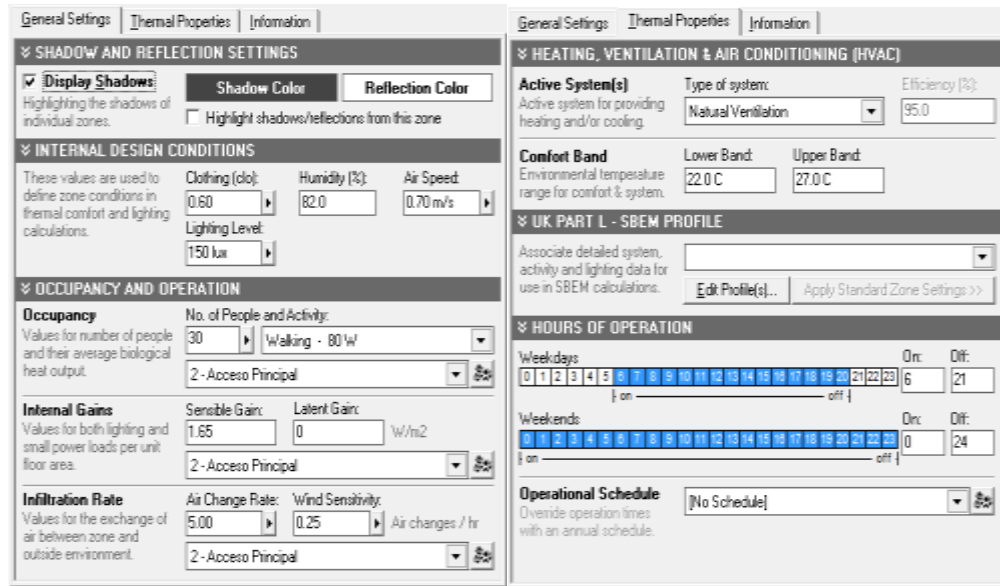


Figura 24. Parámetros básicos de entrada del modelo ajustados para el acceso principal

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	23,5	24,7	4,9
10	23,9	24,2	1,2
11	24,5	24,7	0,8
12	25,7	25,4	1,2
13	24,8	25,1	1,2
14	25,5	25	2,0
15	25,2	25	0,8
16	26	24,8	4,8
17	24,3	24,7	1,6
18	24,3	24,7	1,6
Error máximo			4,9

Tabla 12. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo, ajustando las condiciones de operación

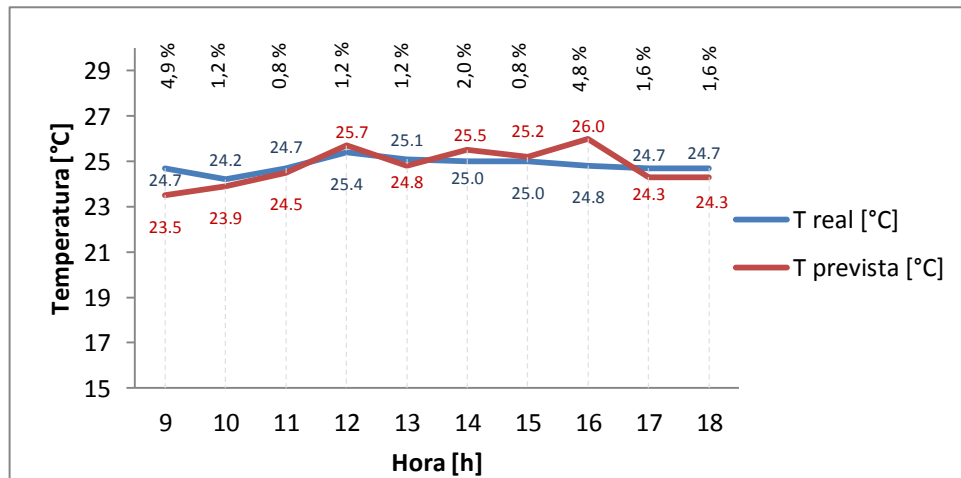


Figura 25. Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según *Ecotect* (azul) para el modelo, ajustando las condiciones de operación

1.4. Ajuste de las condiciones climáticas

Al revisar el archivo meteorológico disponible se observó que las condiciones climáticas que más se asemejaban a las del 1 de marzo del 2013, fueron las del 25 de marzo de 2011.

En la Tabla 13. y en la Figura 26 se presenta la comparación de las temperaturas para el interior de la zona del acceso principal. Una vez realizado este ajuste se elevó el error máximo al 8,1%.

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	23,7	24,7	4,0
10	23,5	24,2	2,9
11	23,9	24,7	3,2
12	23,9	25,4	5,9
13	23,4	25,1	6,8
14	23,7	25	5,2
15	23,5	25	6,0
16	22,9	24,8	7,7
17	22,8	24,7	7,7
18	22,7	24,7	8,1
Error máximo			8,1

Tabla 13. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo, ajustando las condiciones climáticas para el acceso principal

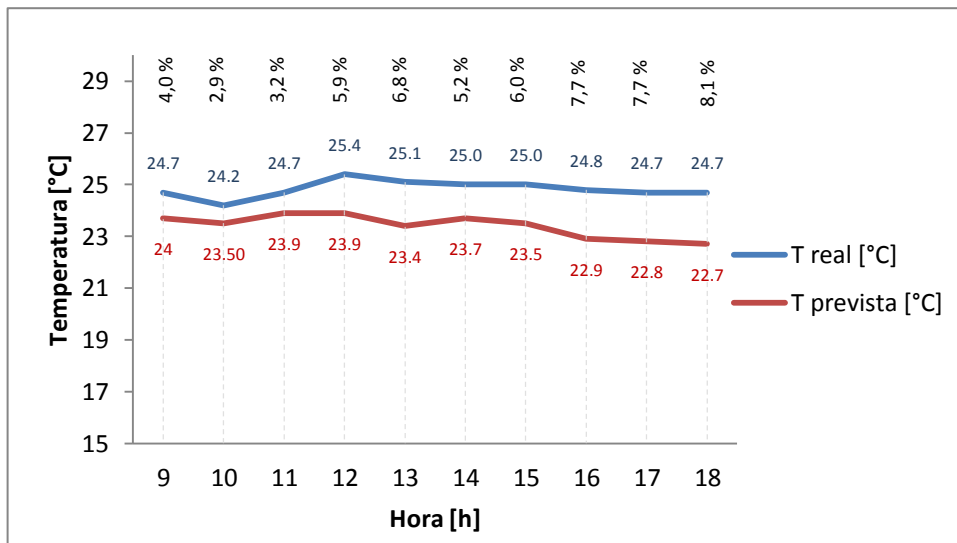


Figura 26. Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según *Ecotect* (azul) para el modelo, ajustando las condiciones climáticas para el acceso principal

1.5. Ajuste de la geometría de la zona

Con base en los planos arquitectónicos del edificio y las medidas realizadas en sitio se ajustaron las dimensiones de los muros y las propiedades térmicas de los elementos constitutivos de la edificación. La comparación de los datos tomados en sitio con los simulados por *Ecotect* se muestra en la Tabla 14 y en la Figura 27.

Al realizar todos los ajustes correspondientes, finalmente se logró obtener un error máximo del 7,3%, por lo tanto se considera que la zona ha sido calibrada.

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	23,3	24,7	5,7
10	23,1	24,2	4,5
11	23,5	24,7	4,9
12	23,7	25,4	6,7
13	23,8	25,1	5,2
14	24,0	25,0	4,0
15	23,9	25,0	4,4
16	23,8	24,8	4,0
17	23,7	24,7	4,0

18	22,9	24,7	7,3
Error máximo			7,3

Tabla 14. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según Ecotect para el modelo, ajustando las dimensiones de los muros y las propiedades térmicas de los materiales

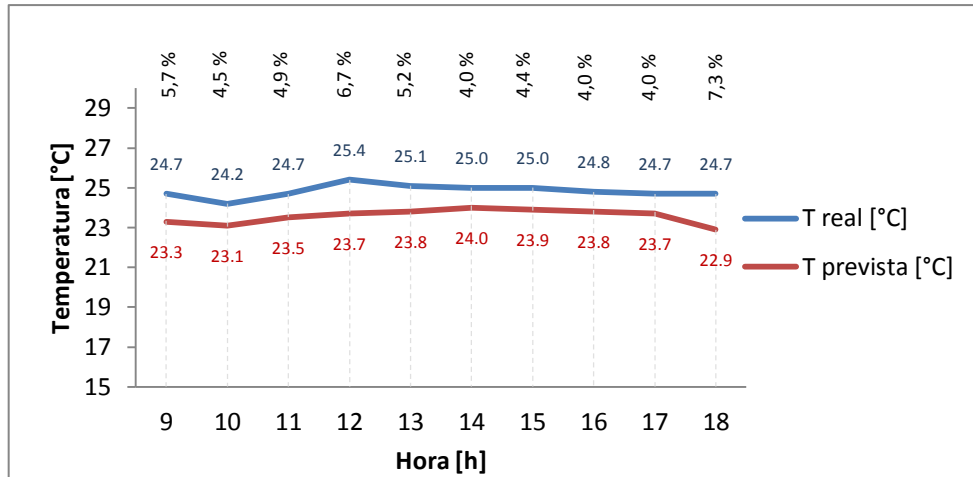


Figura 27. Comparación entre la temperatura medida en sitio (azul) y la temperatura según Ecotect para el modelo (roja), ajustando las dimensiones de los muros y las propiedades térmicas de los materiales

1.6. Zona ajustada

En la Figura 28 se muestra el comportamiento de la temperatura interna de la zona inicialmente para el modelo sin ajustar, la temperatura para el modelo ajustado y la temperatura medida en sitio.

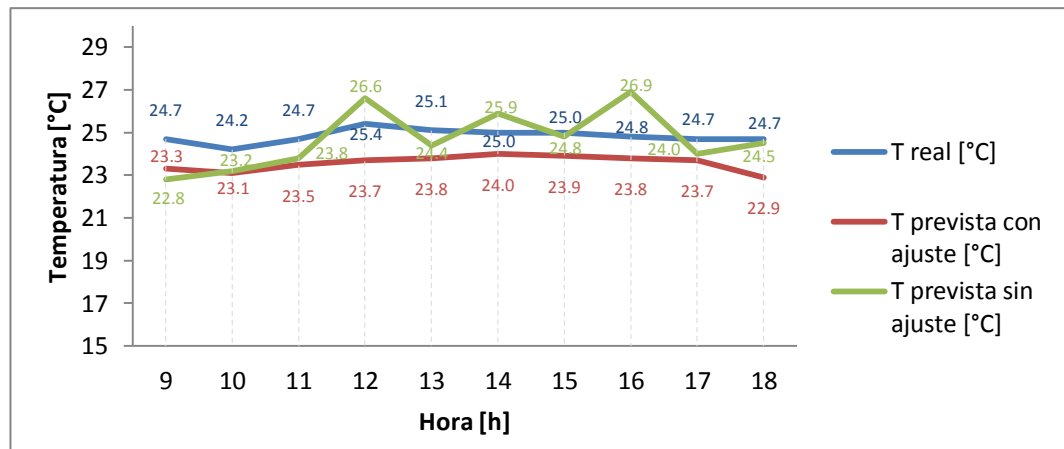


Figura 28. Comparación entre la temperatura medida en sitio (azul), la temperatura interna con el modelo sin calibrar (verde) y la temperatura para el modelo calibrado (roja)

2. Centro de estudios

A continuación se presentan los pasos seguidos para ajustar la zona correspondiente al Centro de Estudios.

2.1. Parámetros básicos

Los parámetros básicos hacen referencia a las mediciones realizadas en sitio. En la Tabla 15 se presentan los datos recolectados en sitio.

FECHA	HORA	CLIMA	TEMPERATURA	HUMEDAD
jueves, 14 de febrero de 2013	09:00	Soleado, cielo despejado	24,5	55%
	10:00	Soleado, cielo despejado	24,1	56%
	11:00	Soleado, cielo despejado	25,9	58%
	12:00	Soleado, cielo despejado	25,2	55%
	13:00	Soleado, cielo despejado	26,1	56%
	14:00	Soleado, cielo despejado	25,4	56%
	15:00	Soleado, cielo despejado	25,0	54%
	16:00	Soleado, cielo despejado	24,5	55%
	17:00	Soleado, cielo despejado	24,3	53%
	18:00	Cielo despejado	24,2	53%

Tabla 15. Datos recolectados en el salón de estudios

2.2. Simulación sin ajustar

Antes de realizar algún ajuste se simuló la temperatura interna de la zona de manera que pudiera ser posteriormente comparado cuando se tuviera la zona ajustada. En la Tabla 16 y en la Figura 29 se presentan las condiciones del Salón de Estudios simulado en *Autodesk Ecotect Analysis* sin ajustar.

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	57,9	24,5	136,3
10	59,0	24,1	144,8
11	59,1	25,9	128,2
12	59,2	25,2	134,9
13	58,2	26,1	123,0
14	60,1	25,4	136,6
15	60,1	25,0	140,4
16	60,1	24,5	145,3
17	58,6	24,3	141,2
18	58,4	24,2	141,3
Error máximo			145,3

Tabla 16. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo aún sin ajustar para el Salón de Estudios

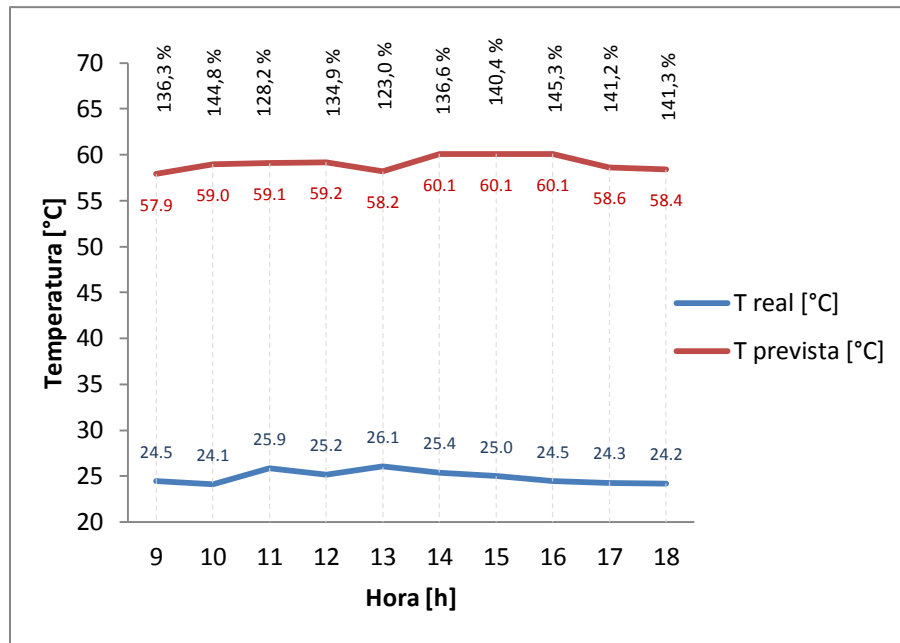


Figura 29. Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según Ecotect (azul) para el modelo sin ajustar para el Salón de Estudios

2.3. Ajuste de las condiciones de operación de la zona

Las condiciones de operación del Salón de Estudios fueron ajustadas según la ocupación para un día normal de trabajo.

SHADOW AND REFLECTION SETTINGS

- Display Shadows
- Shadow Color: [] Reflection Color: []
- Highlight shadows/reflections from this zone

INTERNAL DESIGN CONDITIONS

- Clothing (clo): 0.60
- Humidity (%): 55.0
- Air Speed: 0.50 m/s
- Lighting Level: 500 lux

OCCUPANCY AND OPERATION

- Occupancy:** No. of People and Activity: 50, Reading - 55'w, 102 - Centro de Estudios
- Internal Gains:** Sensible Gain: 13.4, Latent Gain: 0 W/m2, 102 - Centro de Estudios
- Infiltration Rate:** Air Change Rate: 0.50, Wind Sensitivity: 0.25, Air changes / hr, 102 - Centro de Estudios

HEATING, VENTILATION & AIR CONDITIONING (HVAC)

- Active System(s): Full Air Conditioning, Efficiency (%): 35.0
- Thermostat Range: Lower Band: 22.0 C, Upper Band: 27.0 C

UK PART L - SBEM PROFILE

- Associate detailed system, activity and lighting data for use in SBEM calculations. [Edit Profile(s)...] [Apply Standard Zone Settings >>]

HOURS OF OPERATION

- Weekdays:** 0 1 2 3 4 5 6 7 | on | 8 16 24 32 40 48 56 64 72 80 88 96 104 112 120 128 136 144 152 160 168 176 184 192 200 208 216 224 232 240 | off | On: 8, Off: 20
- Weekends:** 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 | on | off | On: 0, Off: 24
- Operational Schedule:** [No Schedule]

Figura 30. Parámetros básicos de entrada del modelo ajustados para el salón de estudios

En la Tabla 17 y la Figura 31 se presenta la comparación de la temperatura medida en sitio y la simulada por el software. Al realizar este ajuste se obtuvo un error máximo del 7,9%

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	26,0	24,5	6,1
10	26,0	24,1	7,9
11	26,0	25,9	0,4
12	26,0	25,2	3,2
13	26,0	26,1	0,4
14	26,0	25,4	2,4
15	26,0	25,0	4,0
16	26,0	24,5	6,1
17	26,0	24,3	7,0
18	26,0	24,2	7,4
Error máximo			7,9

Tabla 17. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según Ecotect para el modelo, ajustando las condiciones de operación para el Salón de Estudios

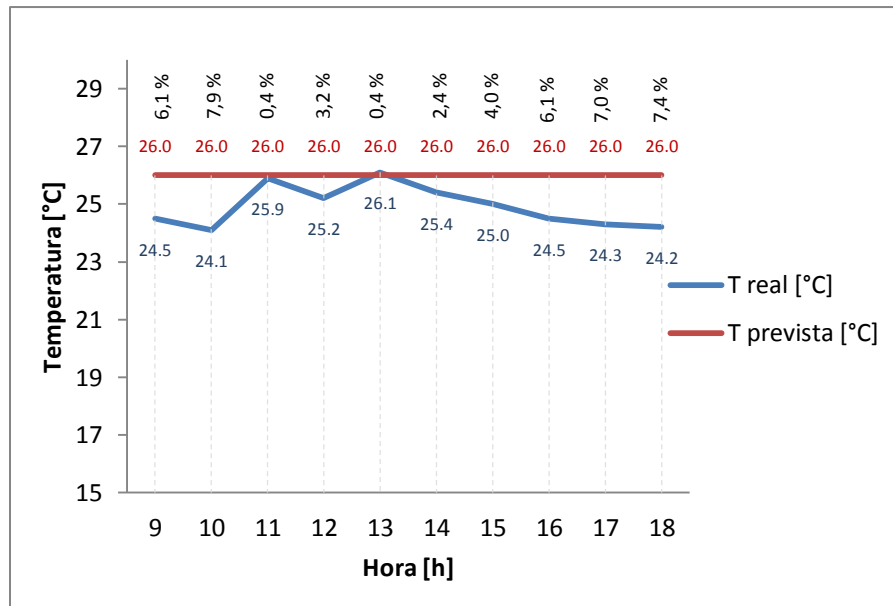


Figura 31. Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según Ecotect (azul) para el modelo, ajustando las condiciones de operación para el Salón de Estudios

Debido a que la zona cuenta con aire acondicionado el software asume que la temperatura se va a mantener constante dentro de la zona de confort determinada independientemente del clima exterior. Al realizar el ajuste de las condiciones de operación se logró reducir el error máximo en un 137,4%. Independientemente de los ajustes posteriores que se realicen como el de las condiciones climáticas o la geometría de la zona, el valor de la temperatura interna de la simulación para las horas que funciona el aire acondicionado no va a variar.

2.4. Resultado de zona ajustada

En la Figura 32 se muestra el comportamiento de la temperatura interna de la zona inicialmente para el modelo sin ajustar, la temperatura para el modelo ajustado y la temperatura medida en sitio.

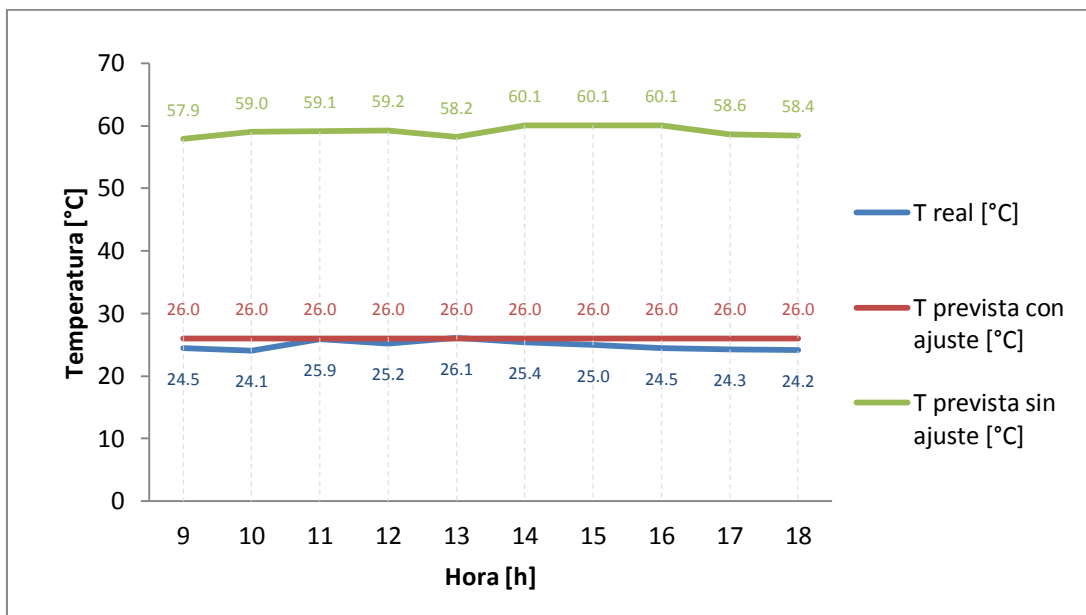


Figura 32. Comparación entre la temperatura medida en sitio (azul), la temperatura interna con el modelo sin calibrar (verde) y la temperatura para el modelo calibrado (roja)

3. Sala de computo

A continuación se presentan los pasos seguidos para ajustar la zona correspondiente al Salón de Computo.

3.1. Parámetros básicos

Los parámetros básicos hacen referencia a las mediciones realizadas en sitio. En la Tabla 18 se presentan los datos recolectados en sitio.

FECHA	HORA	CLIMA	TEMPERATURA	HUMEDAD
miércoles, 27 de febrero de 2013	09:00	Poco nublado	24,5	58%
	10:00	Soleado, cielo despejado	24,1	60%
	11:00	Soleado, cielo despejado	25,1	59%
	12:00	Soleado, cielo despejado	25,8	57%
	13:00	Soleado, cielo despejado	26,0	56%
	14:00	Soleado, cielo despejado	25,9	56%
	15:00	Soleado, cielo despejado	24,7	58%
	16:00	Soleado, cielo despejado	24,4	57%
	17:00	Soleado, cielo despejado	24,3	55%
	18:00	Cielo despejado	24,1	59%

Tabla 18. Datos recolectados en el salón de computo

3.2. Simulación sin ajustar

Antes de realizar algún ajuste se simuló la temperatura interna de la zona de manera que pudiera ser posteriormente comparado cuando se tuviera la zona ajustada. En la Tabla 19 y en la Figura 33 se presentan las condiciones del Salón de Estudios simulado en *Autodesk Ecotect Analysis* sin ajustar.

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	67,3	24,5	174,7
10	67,7	24,5	176,3
11	67,9	25,1	170,5
12	64,2	25,8	148,8
13	64,4	26,0	147,7
14	64	25,9	147,1
15	63,7	24,7	157,9
16	67,4	24,4	176,2
17	67,4	24,3	177,4
18	66,9	24,1	177,6
Error máximo			177,6

Tabla 19. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo aún sin ajustar

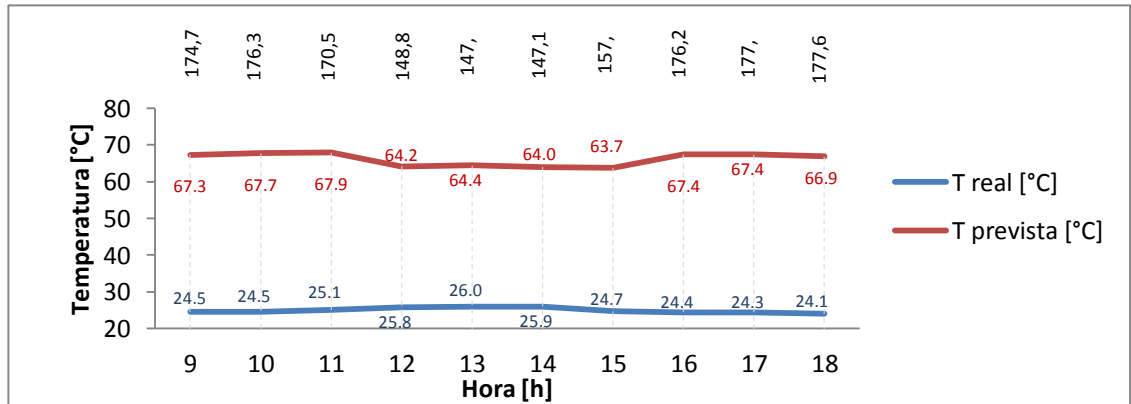


Figura 33. Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según *Ecotect* (azul) para el modelo sin ajustar

3.3. Ajuste de las condiciones de operación de la zona

Las condiciones de operación del Salón de Computo fueron ajustadas según la ocupación para un día normal de trabajo. En la Tabla 20 y la Figura 34 se presenta la comparación de la temperatura medida en sitio y la simulada por el software. Al realizar este ajuste se obtuvo un error máximo del 7,9%

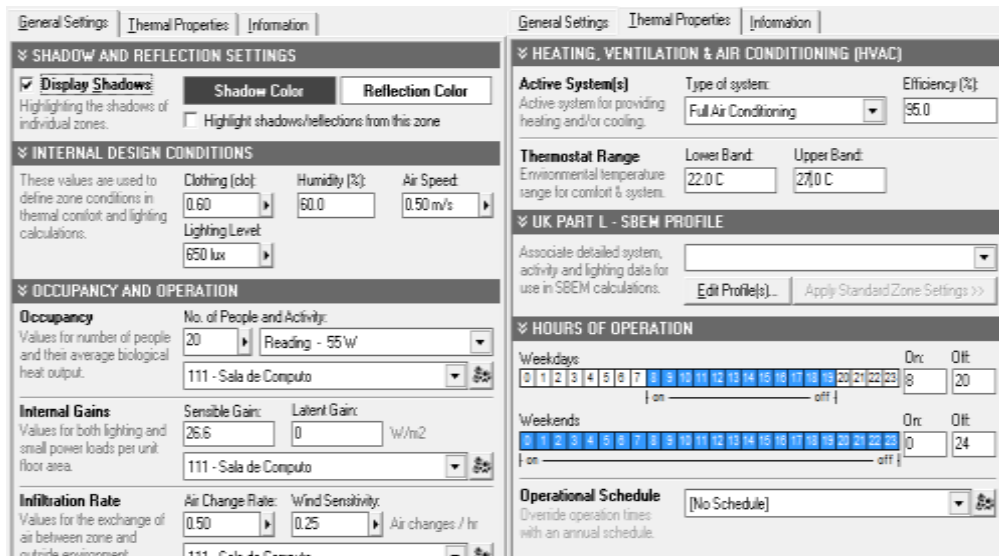


Figura 34. Parámetros básicos de entrada del modelo ajustados

Hora [h]	T prevista [°C]	T real [°C]	Error [%]
9	26,0	24,5	6,1
10	26,0	24,5	6,1
11	26,0	25,1	3,6
12	26,0	25,8	0,8
13	26,0	26,0	0,0
14	26,0	25,9	0,4
15	26,0	24,7	5,3
16	26,0	24,4	6,6
17	26,0	24,3	7,0
18	26,0	24,1	7,9
Error máximo			7,9

Tabla 20. Comparación entre la temperatura medida en sitio y la temperatura según *Ecotect* para el modelo, ajustando las condiciones de operación para el Salón de Computo

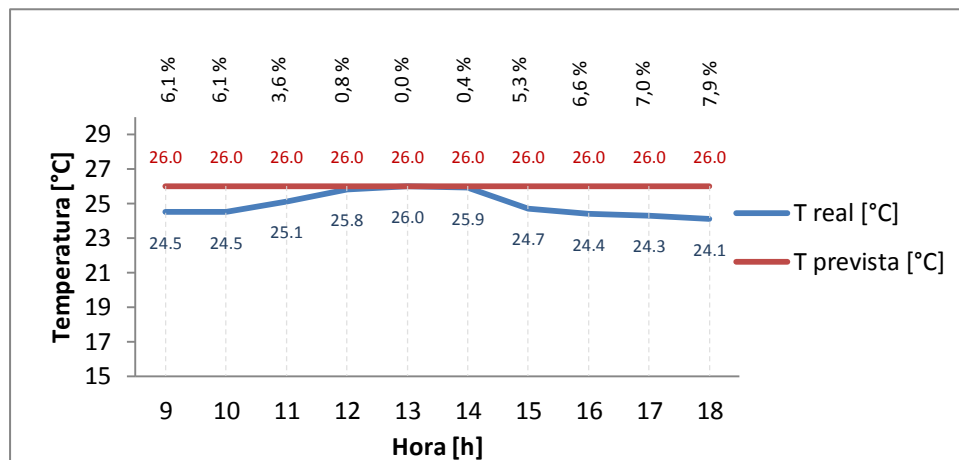


Figura 35. Comparación entre la temperatura medida en sitio (roja) y la temperatura según *Ecotect* (azul) para el modelo, ajustando las condiciones de operación para el Salón de Computo

Debido a que la zona cuenta con aire acondicionado el software asume que la temperatura se va a mantener constante dentro de la zona de confort determinada. Al realizar el ajuste de las condiciones de operación se logró reducir el error máximo en un 169,7%. Independientemente de los ajustes posteriores que se realicen como el de las condiciones climáticas o la geometría de la zona, el valor de la temperatura interna de la simulación para las horas que funciona el aire acondicionado no va a variar.

3.4. Resultado de zona ajustada

En la Figura 36 se muestra el comportamiento de la temperatura interna de la zona inicialmente para el modelo sin ajustar, la temperatura para el modelo ajustado y la temperatura medida en sitio.

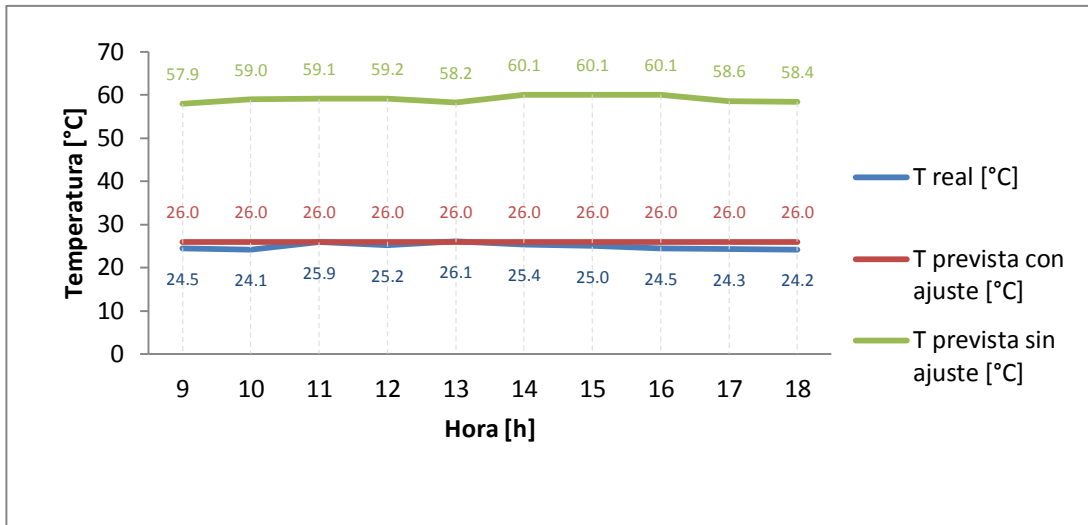


Figura 36. Comparación entre la temperatura medida en sitio (azul), la temperatura interna con el modelo sin calibrar (verde) y la temperatura para el modelo calibrado (roja) para el Salón de Computo

ANEXO C. Registro de cambios

En presente anexo se expone el formato utilizado para el registro de cambios realizados en el modelo.

Descripción			Valor		Observaciones
ZONA	Elemento	Variable	Antes	Después	
Salón Fundadores	Muro_15_cm	Material primario y alterno	Muro_interno	Muro_15_cm	Cambio de muro interno por muro de 15 cm para material primario y alterno
Cafetería	Muro_15_cm	Material primario y alterno	Muro_interno	Muro_15_cm	Cambio de muro interno por muro de 15 cm para material primario y alterno
Profesores catedra	Muro_15_cm	Material primario y alterno	Muro_interno	Muro_15_cm	Cambio de muro interno por muro de 15 cm para material primario y alterno
Baño hombres	Muro_30_cm	Material primario y alterno	Muro_interno	Muro_30_cm	Cambio de muro interno por muro de 30 cm para material primario y alterno
Salón computo 0.1	Muro_15_cm	Material primario y alterno	Muro_interno	Muro_15_cm	Cambio de muro interno por muro de 15 cm para material primario y alterno
Salón excelencia	Muro_15_cm	Material alterno	Muro_interno	Muro_15_cm	Cambio de muro interno por muro de 15 cm para material alterno
Información	Muro_15_cm	Material primario y alterno	Muro_interno	Muro_15_cm	Cambio de muro interno por muro de 15 cm para material alterno
Baño hombres auditorio	Muro_15_cm	Material primario y alterno	Muro_interno	Muro_15_cm	Cambio de muro interno por muro de 15 cm para material alterno
Centro de Estudios	Muro_30_cm	Material secundario	Muro_30_cm	Muro_interno	Cambio de muro de 30 por muro interno, según planos arquitectónicos
	Muro_30_cm	Material secundario	Muro_30_cm	Muro_interno	Cambio de muro de 30 por muro interno, según planos arquitectónicos
	Materiales	Material secundario	Ventana	Muro interno	Definición de material primario ventana, material secundario muro interno
	Materiales	Material secundario	Muro interno	Ventana	Definición de material primario muro, material secundario ventana
Acceso Principal	Puerta de vidrio	U-value	X	5.44 W/m ²	Se modificarán las propiedades térmicas de los materiales
		Admitance	X	5.45 W/m ²	
		Thermal decrement	X	1	

		Thermal Lag	X	0.13 h	
	Puerta				Puerta definida como muro, cambia a puerta de madera
301	Muro_15_cm	Material primario y secundario	Muros_internos	Muro_15_cm	Cambio de muro de 10cm por muro de 15 cm primario y alterno
302	Muro_15_cm	Material primario y secundario	Muros_internos	Muro_15_cm	Cambio de muro de 10cm por muro de 15 cm primario y alterno
303	Muro_15_cm	Material alterno	Muros_internos	Muro_15_cm	Cambio de material alterno a 15 cm
304	Muro_30_cm	Material alterno	Muros_internos	Muro_30_cm	Cambio de material alterno a 30 cm
	Muro_15_cm	Material alterno	Muros_internos	Muro_30_cm	Cambio de material alterno a 15 cm
305	Muro_15_cm	Material primario y secundario	Muros_internos	Muro_15_cm	Cambio de muro de 10cm por muro de 15 cm primario y alterno
306	Muro_15_cm	Material primario y secundario	Muros_internos	Muro_15_cm	Cambio de muro de 10cm por muro de 15 cm primario y alterno
309	Muro_15_cm	Material primario y secundario	Muros_internos	Muro_15_cm	Cambio de muro de 10cm por muro de 15 cm primario y alterno
402	Muros_internos	Principal material			
403	Muro_30_cm Muro N-W-W	Material primario	Muros_internos	Muro_30_cm	<u>Muro N-W-W:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_30_cm AMBOS
	Muro_30_cm Muro N-E	Material primario	Muros_internos	Muro_30_cm	<u>Muro adyacente al pasillo:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_30_cm AMBOS
Pasillo piso 4	Muro_30_cm Muro baño H	Material primario	Muros_internos	Muro_30_cm	<u>Muro baño hom:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_30_cm AMBOS

	Muro_30_cm Muro baño M	Material primario	Muros_internos	Muro_30_cm	<u>Muro baño muj:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_30_cm AMBOS
	Muro_30_cm compartido con aula 403	Material primario	Muros_internos	Muro_30_cm	<u>Muro adyacente con aula 403:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_30_cm AMBOS
Room 4.2	Muro_15_cm Muro este	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<u>Muro adyacente con aula 405:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_15_cm AMBOS
405	Muro_15_cm Muro adyacente con room 4.2	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<u>Muro adyacente con room 4.2:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_15_cm AMBOS
408	Muro_15_cm Muro W, al exterior	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<u>Muro W,al exterior:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_15_cm AMBOS
415	Muro_15_cm Muro E, al exterior	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<u>Muro E,al exterior:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_15_cm AMBOS
Auxiliares	Muro_15_cm Muro E, al exterior	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<u>Muro E,al exterior:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_15_cm AMBOS
401	Muro_15_cm Muro E, al exterior	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<u>Muro E,al exterior:</u> el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_15_cm AMBOS

Baño H y M piso 4	Muro_30_cm Muros baño H y M	Material primario	Muros_internos	Muro_30_cm	<i>Muros baño H y M adyacentes al pasillo</i> : el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_30_cm AMBOS
506	Muro_15_cm Muro E	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<i>Muro adyacente con aula 505</i> : el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_15_cm AMBOS
505	Muro_15_cm Muro W	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<i>Muro adyacente con aula 506</i> : el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. El material principal y secundario fueron modificados a muros_15_cm AMBOS
501	Muro_15_cm Muro E, al exterior	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<i>Muro E, al exterior: el material principal y secundario estaban definidos como muro interno.</i> <i>El material principal y secundario fueron modificados a muros 15 cm AMBOS</i>
508	Muro_15_cm Muro W, al exterior	Material primario	Muros_internos	Muro_15_cm	<i>Muro W, al exterior: el material principal y secundario estaban definidos como muro interno.</i> <i>El material principal y secundario fueron modificados a muros 15 cm AMBOS</i>
Baño H y M piso 5	Muro_30_cm Muros baño H y M	Material primario	Muros_internos	Muro_30_cm	<i>Muros baño H y M adyacentes al pasillo</i> : el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. <i>El material principal y secundario fueron modificados a muros 30 cm AMBOS</i>
Pasillo piso 5	Muro_30_cm Muros baño H y M	Material primario	Muros_internos	Muro_30_cm	<i>Muros adyacentes a baños H y M</i> : el material principal y secundario estaban definidos como muro interno. <i>El material principal y secundario fueron modificados a muros 30 cm AMBOS</i>

Tabla 21. Ajuste de Cambios