

**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*:**

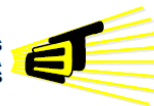
**Creación del Modelo de Información de la Edificación (BIM) e
identificación preliminar de puntos críticos de potencial consumo**

Por:

**Mayra Alejandra López Castellanos
Ángela María Rojas Herrera
Ivonne Astrid Ruiz Maldonado**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2012**

**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:***

**Creación del Modelo de Información de la Edificación (BIM) e
identificación preliminar de puntos críticos de potencial
consumo**

Autores:

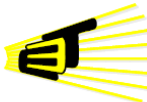
**Mayra Alejandra López Castellanos
Ángela María Rojas Herrera
Ivonne Astrid Ruiz Maldonado**

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

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



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2012**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fortaleza y sabiduría en los momentos que tuve obstáculos y que creí no tener solución. Este logro es posible a los dones del Espíritu Santo y del poder victorioso de mamita María.

A mis padres Bernardo López y Myriam Castellanos por ser mi apoyo en este camino, por su sacrificio y amor Incondicional, y darme esta oportunidad de seguir con este sueño.

A mi hermana y toda la familia Castellanos por ser la alegría de mi corazón.

Al Director y amigo German Osma, quien nos orientó con sus aportes académicos, su dedicación y su tiempo, haciendo posible la realización de este trabajo de grado.

A mis compañeras Ángela e Ivonne, por la paciencia y por sus enseñanzas.

Alejandra López Castellanos

AGRADECIMIENTOS

*A mi mamá, mi papá, Diana y
Daniel, quienes siempre me han
apoyado incondicionalmente.*

Ángela María Rojas Herrera

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeras, por el tiempo compartido, por cada aprendizaje, por la dedicación y esfuerzo reflejados en este trabajo.

A nuestro director, Germán Osma, por su guía y por todo lo que aprendí de él durante este proceso.

A cada uno de mis profesores, que compartieron sus conocimientos conmigo, y me formaron como profesional.

Y a mí misma, por el trabajo arduo y las noches en vela finalmente recompensadas con este gran logro.

Ivonne Astrid Ruíz Maldonado

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	22
1.1. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICACIONES.....	23
1.2. AUTODESK ECOTECH ANALYSIS	25
1.3. SISTEMA DE CERTIFICACIÓN LEED.....	28
1.4. CONFORT TÉRMICO	28
1.5. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN.....	31
1.6. ESTRUCTURA DEL REPORTE DE INVESTIGACIÓN	33
1.7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES A PARTIR DE <i>AUTODESK ECOTECH ANALYSIS</i>	37
2.1 FASE 1. CREACIÓN DEL MODELO DE INFORMACIÓN DE EDIFICACIÓN (BIM) 38	
2.1.1 Estudio de la herramienta <i>Autodesk Ecotech Analysis</i>	38
2.1.2 Recopilación de datos.....	38
2.1.3 Creación del modelo tridimensional de la edificación	39
2.1.4 Asignación de los materiales constructivos	40
2.1.5 Verificación de adyacencia entre zonas térmicas.....	41
2.1.6 Definición de condiciones de operación de las zonas térmicas	42
2.1.7 Modelado de obstrucciones y otros aspectos complementarios	43
2.2 FASE 2. GUIA DE INTERPRETACIÓN DE SIMULACIONES PRELIMINARES Y DEFINICIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS	44
2.2.1 Guía de interpretación de las simulaciones.....	44
2.2.2 Identificación de espacios interiores críticos a través de variables	45
2.2.3 Selección de los espacios interiores críticos	45
2.3 FASE 3. PRE-EVALUACIÓN LEED V3.0.....	46
2.3.1 Recopilación de información de los requisitos y pre-requisitos de la sección <i>Energy and Atmosphere</i>	46
2.3.2 Definición del <i>baseline</i> para la edificación.....	47
2.3.3 Pre-evaluación de la sección <i>Energy and Atmosphere</i> del estándar LEED V3.0	47
2.4 CALIBRACIÓN DEL BIM.....	47
2.4.1 Estructuración del plan para llevar a cabo la calibración del BIM	48
2.4.2 Medición y recolección de datos	48

2.4.3	Comparación de las salidas del modelo con los datos medidos y ajustes pertinentes	49
2.5	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS.....	49
2.5.1	Simulación de sistemas HVAC, radiación solar e iluminación natural.....	50
2.5.2	Verificación de la influencia de parámetros en la simulación	50
2.5.3	Representación de resultados mediante gráficos y tablas.....	51
2.5.4	Interpretación de resultados y recomendaciones constructivas para tener en cuenta en futuros proyectos.....	51
2.6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
3.	CREACIÓN DEL BUILDING INFORMATION MODELLING DEL EEEIE.....	52
3.1.	MODELO GEOMÉTRICO DEL EDIFICIO	53
3.1.1.	Selección de la herramienta para la creación del modelo geométrico	54
3.1.2.	Creación del modelo geométrico en Graphisoft ArchiCAD	55
3.1.3.	Definición de las zonas térmicas en <i>Graphisoft ArchiCAD</i>	57
3.1.4.	Importación del modelo geométrico a <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	59
3.2.	ASIGNACIÓN DE LOS MATERIALES CONSTRUCTIVOS.....	61
3.3.	VERIFICACIÓN DE ADYACENCIA ENTRE ZONAS TÉRMICAS.....	63
3.4.	ORIENTACIÓN DEL EDIFICIO	65
3.5.	MODELADO DE OBSTRUCCIONES.....	65
3.6.	MODELADO DEL SUELO Y RELIEVE ADYACENTE	67
3.7.	DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LAS ZONAS.....	69
3.7.1.	Condiciones internas de diseño	70
3.7.2.	Ocupación.....	72
3.7.3.	Ganancias internas	72
3.7.4.	Tasa de intercambio de aire.....	73
3.7.5.	Tipo de sistema de climatización.....	75
3.7.6.	Rango de temperaturas de confort.....	76
3.8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
4.	CREACIÓN DEL ARCHIVO DE DATOS METEOROLÓGICOS	78
4.1	MEDICIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS	79
4.2.	VARIABLES CLIMÁTICAS REQUERIDAS.....	80
4.3.	VARIABLES CLIMÁTICAS DE CÁLCULO INDIRECTO	81
4.3.1.	Humedad específica	81
4.3.2.	Irradiancia solar horizontal difusa.....	83
4.3.3.	Irradiancia solar normal directa	83
4.3.4.	Nubosidad.....	84
4.4.	CREACIÓN DE ARCHIVO DE EXCEL COMPATIBLE CON <i>WEATHER TOOL</i>	85

4.4.1.	Cambio de formato de datos y conversión de unidades	86
4.4.2.	Organización de los datos meteorológicos en un archivo delimitado por comas	87
4.5.	CREACIÓN DE ARCHIVO .WEA CON <i>WEATHER TOOL</i>	87
4.6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
5.	GUIA PARA LA INTERPRETACIÓN DE SIMULACIONES REALIZADAS CON <i>AUTODESK ECOTECH ANALYSIS</i>	91
5.1.	CONFORT TÉRMICO	92
5.1.1.	Comportamiento de la temperatura interna de la zona	94
5.1.2.	Requerimiento de aire acondicionado	95
5.1.3.	Relación entre los grados-hora de desconfort y las ganancias térmicas.....	95
5.2.	TEMPERATURA INTERNA.....	97
5.3.	CARGAS ESPACIALES	98
5.3.1.	Aire acondicionado permanente.....	99
5.3.2.	Sistema de modo combinado.....	101
5.4.	DERECHO A LA LUZ.....	102
5.4.1.	Envolvente solar	103
5.4.2.	Componente vertical del cielo	104
5.4.3.	Línea sin cielo	105
5.5.	DISTRIBUCIÓN DE GANANCIAS TERMICAS INDIVIDUALES	106
5.6.	EXPOSICIÓN SOLAR.....	111
5.6.1.	Exposición solar día	111
5.7.	FACTOR DE LUZ DÍA (<i>DAYLIGHT FACTOR</i>)	113
5.7.1	Los sensores fotoeléctricos.....	115
5.8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
6.	IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS EN ESPACIOS INTERIORES DEL EEEIE	120
6.1	PRE-SELECCIÓN DE LOS ESPACIOS INTERIORES CRÍTICOS DEL EEEIE	121
6.2.	SIMULACIONES REALIZADAS A LOS ESPACIOS INTERIORES	123
6.2.1.	Confort térmico	123
6.2.2	Simulaciones de temperatura interna.....	125
6.2.3.	Cargas espaciales	126
6.2.4.	Derecho a la luz	128
6.2.5.	Distribución de ganancias térmicas individuales	133
6.2.6.	Determinación del <i>Daylight Factor</i> (simulaciones de iluminación natural)	134
6.3.	SELECCIÓN DE LOS ESPACIOS CRITICOS.....	135
6.4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

7. PRE-EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA DEL EEEIE SEGÚN EL ESTÁNDAR LEED V3.0.....	138
7.1. SISTEMA DE CERTIFICACIÓN LEED.....	139
7.2. VALORACIÓN LEED A PRIORI DEL EEEIE.....	141
7.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
8. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	147
8.1. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES A PARTIR DE <i>AUTODESK ECOTECH ANALYSIS</i> (Capítulo 2).....	147
8.2. CREACIÓN DEL BUILDING INFORMATION MODELLING DEL EEEIE (Capítulo 3).....	149
8.3. CREACIÓN DEL ARCHIVO DE DATOS METEOROLÓGICOS (Capítulo 4).....	152
8.4. GUÍA PARA INTERPRETACIONES DE SIMULACIONES (Capítulo 5).....	153
8.5. IDENTIFICACION DE PUNTOS CRÍTICOS DE LOS ESPACIOS INTERIORES DEL EEEIE (Capítulo 6)	154
8.6. PRE-EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA DEL EEEIE SEGÚN EL ESTÁNDAR LEED V3.0 (Capítulo 7)	155
ANEXOS.....	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de simulación del comportamiento energético de un edificio con herramientas computacionales	24
Figura 1.2. Nivel de información y datos requeridos por los diferentes tipos de análisis.....	27
Figura 1.3. Factores que inciden en el confort térmico.....	30
Figura 1.4. Descripción del contenido del reporte del trabajo de investigación.....	34
Figura 2.1. Fases y etapas de la metodología propuesta.....	37
Figura 2.2 Diagrama de flujo de la creación del modelo 3D de la edificación	40
Figura 2.3. Separación entre zonas al definir las usando el contorno interno del aula – Vista lateral	42
Figura 2.4. Forma en que Autodesk Ecotect Analysis interpreta el elemento adyacente (Muro 2)	42
Figura 3.1 Descripción gráfica de la estructura del capítulo 3.....	53
Figura 3.2. Modelo geométrico del Edificio de Estudios Industriales y Empresariales Graphisoft ArchiCAD	57
Figura 3.3. Zonas del Edificio de Estudios Industriales y Empresariales trazadas con Graphisoft ArchiCAD	58
Figura 3.4. Ventanas fuera de los muros en el modelo del EEEIE.....	59
Figura 3.5. Modelo de las escaleras de emergencia creado en Google SketchUp.....	60
Figura 3.6. Modelo geométrico del EEEIE en Autodesk Ecotect Analysis – Editor 3D.....	61
Figura 3.7. Modelo geométrico del EEEIE en Autodesk Ecotect Analysis – Visualise	61
Figura 3.8. Capturas del asistente de Autodesk Ecotect Analysis para asignar materiales.....	62
Figura 3.9. Separación entre zonas al definir las usando el contorno interno del aula Vista lateral.....	64
Figura 3.10. Forma en que Autodesk Ecotect Analysis interpreta el elemento adyacente (Muro 2)	64
Figura 3.11. Definición de la orientación de la edificación en Autodesk Ecotect Analysis	65
Figura 3.12. Obstrucciones adyacentes al EEEIE vistas desde el Noroeste – SketchUp.....	67
Figura 3.13 Montículo de tierra adyacente a una zona térmica de un edificio, modelado mediante planos pertenecientes a la Zona Exterior.....	69
Figura 3.14. Asistente para administrar zonas	70
Figura 4.1. Procedimiento seguido para la creación del archivo del clima	79
Figura 4.2. Componentes de la unidad VANTAGE PRO-2 DAVIS.....	80
Figura 4.3. Humedad específica de saturación vs. Temperatura de bulbo seco.....	82
Figura 4.4. Rosa de los vientos.....	87
Figura 4.5. Asistente de importación de datos meteorológicos – Weather Tool	88
Figura 4.6. Entorno de Weather Tool después de la importación	89
Figura 5.1. Simulaciones a realizar con Autodesk Ecotect Analysis	92

Figura 5.2. Simulación de grados-hora de desconfort del aula 515.....	93
Figura 5.3. Promedio mensual de la temperatura de bulbo seco.	94
Figura 5.4. Ganancias térmicas anuales del aula 515.....	96
Figura 5.5. Distribución anual de temperatura del aula 515.....	97
Figura 5.6. Cargas espaciales mensuales del aula 515 – Aire acondicionado.....	100
Figura 5.7. Cargas espaciales mensuales del aula 515 – Sistema de modo combinado.	101
Figura 5.8. Envoltente solar del aula 515 del EEEIE.	103
Figura 5.9. Resultados del cálculo del VSC en el aula 515 del EEEIE.....	105
Figura 5.10. Línea sin cielo del aula 515.....	106
Figura 5.11. Ganancias y pérdidas térmicas consideradas dentro de una zona.....	107
Figura 5.12. Gráfico de la distribución de la Ganancia solar directa (Qz) para el acceso principal.....	108
Figura 5.13. Ganancias y pérdidas del aula 515.....	109
Figura 5.14. Análisis de exposición solar día de la fachada Sur-Interna Aula 515.....	112
Figura 5.15. Cálculo del factor de luz día.....	113
Figura 5.16. Cálculo del diseño de cielo (En lux).....	114
Figura 5.17. Factores que afectan a la penetración de la luz del día en un espacio.....	115
Figura 5.18. Simulación del porcentaje de tiempo al año que el espacio puede trabajar con las luces apagadas, para el control Encendido Apagado.....	116
Figura 5.19. Simulación del porcentaje de tiempo al año que el espacio puede trabajar con las luces apagadas, para el control por interruptor de atenuación.....	117
Figura 6.1. Grados-hora acumulados durante un año en aulas preseleccionadas.....	123
Figura 6.2. Porcentaje de horas en confort de las zonas preseleccionadas.....	126
Figura 6.3. Cargas de Refrigeración mensual mostrando la contribución parcial de cada zona, modo Full Air Conditioning.....	127
Figura 6.4. Cargas de refrigeración mensual mostrando la contribución parcial de cada zona, Mixed-Mode System.....	128
Figura 6.5. Envoltente solar del EEIE en cada una de sus fachadas.....	130
Figura 6.6. Resultados del cálculo del VSC en las fachadas del EEEIE.....	132
Figura 6.7. Valor del Daylight factor para cada uno de los espacios preseleccionados.....	134
Figura 6.8. El porcentaje de tiempo al año en que los espacios preseleccionados pueden operar con las luces apagadas para los dos tipos de control de iluminación.....	135
Figura 7.1. Categorías de evaluación del estándar LEED.....	139
Figura 7.2. Niveles de Certificación LEED.....	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Funciones de <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> para recopilar, presentar y analizar la información de edificaciones.	26
Tabla 1.2. Alcance de los objetivos específicos.	32
Tabla 2.1. Información necesaria en la recopilación de datos.	38
Tabla 3.1. Propiedades que definen los materiales en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	61
Tabla 3.2. Valores que describen las ganancias térmicas aportadas por el tipo de ropa	70
Tabla 3.3. Clasificación del viento de acuerdo a su velocidad.	71
Tabla 3.4. Nivel de iluminancia de diseño dependiendo del tipo de recinto y actividad	71
Tabla 3.5. Calor liberado por un ser humano durante la realización de algunas actividades.	72
Tabla 3.6. Potencia de los equipos considerados para el cálculo a las ganancias sensibles.	73
Tabla 3.7. Tasa de renovaciones de aire de acuerdo a las características de la fachada del edificio. .	73
Tabla 3.8. Sensibilidad del aire de acuerdo a las características del edificio.	74
Tabla 3.9. Tipos de sistemas HVAC que se pueden asignar a una zona en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	75
Tabla 3.10. Tipos de sistemas de climatización usados en el modelo del EEEIE.	75
Tabla 4.1. Humedad específica de saturación correspondiente a intervalos de temperatura.	82
Tabla 4.2. Medida mensual de nubosidad (octas) en el Aeropuerto Palonegro de Bucaramanga – IDEAM ..	85
Tabla 4.3. Equivalencia entre octas y fracción de cielo cubierto.	85
Tabla 4.4 Dirección del viento.	87
Tabla 4.5. Datos de ubicación del EEEIE.	89
Tabla 5.1. Tipos de ganancias simuladas en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	107
Tabla 6.1. Descripción general de cada piso del EEEIE.	121
Tabla 6.2. Criterios considerados para elegir los salones en los que se hicieron las simulaciones. ..	121
Tabla 6.3. Salones pre-seleccionados para realizar las simulaciones en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> , con sus respectivos criterios de selección.	122
Tabla 6.4. Resumen de las características de las zonas preseleccionadas y observaciones relacionadas con el confort térmico.	124
Tabla 6.5. Observaciones sobre los objetos que obstruyen la luz natural que llega al EEIE de acuerdo a su altura.	130
Tabla 6.6. Resultados de simulaciones para identificar puntos críticos del EEEIE.	136
Tabla 6.7. Características de aulas consideradas críticas del EEEIE y razones de su selección.	136
Tabla 7.1. Prerrequisitos para la categoría <i>Energy and Atmosphere</i> [2].	141
Tabla 7.2. Créditos para la categoría <i>Energy and Atmosphere</i> [2].	141
Tabla 7.3. Definición <i>a priori</i> del <i>baseline</i> para EEEIE	142
Tabla 7.4. Evaluación de los prerrequisitos de la categoría <i>Energy and Atmosphere</i>	143
Tabla 7.5. Evaluación de los créditos de la categoría <i>Energy and Atmosphere</i> para los dos escenarios contemplados.	143
Tabla 7.6. Resumen de la puntuación considerando un escenario real.	145
Tabla 7.7. Resumen de la puntuación considerando un escenario ideal.	145

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Definiciones.....	156
ANEXO B. Cálculo de los índices PMV y PPD.	167
ANEXO C. Métodos para establecer franja de confort térmico.	170
ANEXO D. Condiciones de operación de una zona.....	176
ANEXO E. Características de los espacios interiores.....	178
ANEXO F. Descripción de los formatos de importación del modelo geométrico de una Edificación a <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	179
ANEXO G. Modificaciones y simplificaciones realizadas al modelo geométrico del EEEIE	181
ANEXO H. Correcciones realizadas al modelo importado desde <i>Graphisoft ArchiCAD</i>	182
ANEXO I. Descripción de materiales usados en el modelo del EEEIE.	183
ANEXO J. Variables definidas en el archivo del clima creado con <i>Weather Tool</i>	185
ANEXO K. Cálculo de la irradiancia horizontal difusa- Método Collares-Pereira.	187
ANEXO L. Cálculo de la altura solar.	188
ANEXO M. Formas de medir el confort térmico.....	192
ANEXO N. Gráficos de ganancias mensuales del aula 515.	194
ANEXO Ñ. Cumplimiento del derecho a la luz establecido por la BRE	196
ANEXO O. Radiación solar	200
ANEXO P. Medición del <i>Daylight Factor</i>	203
ANEXO Q. Descripción de espacios interiores del EEEIE.	209
ANEXO R. Simulaciones de grados hora de disconfort en zonas seleccionadas del EEEIE	213
ANEXO S. Simulaciones de ganancias individuales.....	216
ANEXO T. Simulaciones de iluminación natural. Determinación del <i>Daylight Factor</i>	217

RESUMEN

TITULO: 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*: Creación del Modelo de Información de la Edificación (BIM) e identificación preliminar de puntos críticos de potencial consumo*.

AUTORES: LÓPEZ CASTELLANOS, Mayra Alejandra**

ROJAS HERRERA, Ángela María**

RUIZ MALDONADO, Ivonne Astrid**

PALABRAS CLAVES: Sostenibilidad energética, propuesta metodológica, *Autodesk Ecotect Analysis*, LEED, análisis energético, ganancias térmicas, temperatura, iluminación, simulaciones.

El uso de la energía eléctrica en las edificaciones es necesario para satisfacer muchas necesidades de sus ocupantes, pero a su vez genera un impacto negativo en el medio ambiente. Para favorecer ambas partes, lo que se busca es lograr diseños arquitectónicos que permitan suplir los requerimientos de los ocupantes de la edificación, en la mayor medida posible, aprovechando los recursos naturales como la radiación solar y la ventilación natural.

Estos diseños se hacen considerando las variables meteorológicas, materiales constructivos, localización geográfica, estructura y obstrucciones, entre otros aspectos que inciden en el comportamiento térmico y lumínico de la edificación. Para ello, en la actualidad se usan herramientas computacionales especializadas como por ejemplo *Autodesk Ecotect Analysis*, con el fin de conocer el comportamiento energético de una edificación en particular y a partir de ello realizar mejoras de diseño que permitan aprovechar mejor los recursos naturales.

En este trabajo de grado se ejecutan las primeras etapas que requiere la evaluación energética del Edificio de Estudios Industriales y Empresariales (EEEIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) usando *Autodesk Ecotect Analysis*. Su finalidad principal es establecer recomendaciones para el uso del software en el diseño de futuros edificios de la universidad.

En el desarrollo del trabajo de grado se recopila la información necesaria para la evaluación energética, se crea el modelo del EEEIE de manera que sea compatible con el software y útil para los análisis, se desarrolla un archivo con la información meteorológica que afecta la edificación, se plantea una guía para el uso de *Autodesk Ecotect Analysis* en análisis energéticos de edificaciones, se sugieren aulas para tener en cuenta en el trabajo de grado posterior que se encargará de la calibración del modelo y se realiza una pre-evaluación LEED del modelo creado.

* Trabajo de investigación de maestría en ingeniería eléctrica

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

ABSTRACT

TITLE: Energetic analysis of Industrial and Business Studies Building according LEED guidelines and using *Autodesk Ecotect Analysis*: Building Information Model (BIM) creation and preliminary identification of potential consumption critical points*.

AUTHOR: LÓPEZ CASTELLANOS, Mayra Alejandra**

ROJAS HERRERA, Ángela María**

RUIZ MALDONADO, Ivonne Astrid**

KEYWORDS: Energy sustainability, proposed methodology, Autodesk Ecotect Analysis, LEED, energy analysis, thermal gains, temperature, lighting, simulations.

Electricity use in buildings is necessary to satisfy many human needs, but in turn generates a significant negative impact on the environment. To advantage both parties, what is sought is to make architectural designs that meet the demands of the occupants of the building, to the greatest extent possible, using natural resources such as sunlight and natural ventilation.

These designs are made considering meteorological variables, construction materials, geographic location, architectural structure and obstructions, among other aspects affecting thermal and light performance of the building. It is commonly used a specialized computer tool such as *Autodesk Ecotect Analysis*, in order to learn energy performance of a particular building and design improvements to make better use of natural resources.

First stages to make energy assessment of Building of Industrial and Business Studies at Industrial University of Santander (UIS) are developed in this thesis using *Autodesk Ecotect Analysis*. Its main purpose is to establish recommendations to design future university buildings with this software.

In the development of the thesis it is compiled information needed to evaluate energy performance of EEEIE, it is created a model of the building compatible with the software and useful for analysis, it is developed a file with weather information that affects the building, it is proposed a guidance to use *Autodesk Ecotect Analysis* on energy analysis of buildings, it is performed a pre-assessment of LEED standard to the building and it is suggested spaces of EEEIE to consider on calibration process that will be executed in a subsequent thesis.

* Research work of master in electrical engineering

** Department of Physical-Mechanical Engineerings. School of Electrical, Electronic and of Telecommunications Engineering

1. INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander se encuentra en un proceso continuo de fortalecimiento de su infraestructura física, actualmente centrado en la remodelación y construcción de edificios. Tal proceso se desarrolla desde un enfoque tradicional de construcción, que se caracteriza por la satisfacción del nivel de confort térmico y visual principalmente mediante estrategias artificiales, considerando en menor medida alternativas más amigables con el medio ambiente.

Para apuntar a un mayor grado de sostenibilidad energética, y mitigar su impacto en el medio ambiente, es necesario mejorar la manera en que la universidad concibe sus edificios. Un primer paso sería realizar el análisis energético de las edificaciones recientemente construidas o remodeladas, lo cual permitiría conocer su desempeño energético, y con base en este análisis, proponer lineamientos a ser considerados en futuros proyectos.

El Grupo de Investigación de Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), de la Universidad Industrial de Santander, ha iniciado el desarrollo de un proyecto a mediano plazo, cuyo objetivo es determinar factores relacionados con el diseño y el clima que tienen mayor incidencia en el consumo energético, por climatización e iluminación, del Edificio de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales (EEEIE), reinaugurado en septiembre de 2011.

Este trabajo de grado desarrolla la primera parte de dicho proyecto, estableciendo un modelo de información de construcción (BIM, por su sigla en inglés: *Building Information Modelling*)¹ del EEEIE, que será calibrado y se usará para simular térmica y lumínicamente la edificación en posteriores trabajos de grado. También se identifican puntos críticos a ser analizados para determinar los

¹ Resultado del modelado en tres dimensiones de una edificación con un software gráfico, incorporando información sobre su diseño, construcción y operación [22]. Esta información incluye la geometría del edificio, relaciones espaciales, información geográfica y propiedades de los elementos constructivos (muros, pisos y techos); como por ejemplo, sus materiales [23].

factores mencionados anteriormente y se plantea una metodología para el análisis energético de edificaciones con el software *Autodesk Ecotect Analysis*.

Para la construcción del BIM se emplean las herramientas computacionales *Graphisoft ArchiCAD*, *Google SketchUp* y *Autodesk Ecotect Analysis*. El último a su vez se usa para realizar una evaluación energética preliminar de aulas del EEEIE, cuyos resultados serán usados para identificar los puntos críticos a tener en cuenta en posteriores trabajos de grado. La evaluación energética se hace a partir de los resultados de simulaciones del comportamiento térmico y lumínico (naturales), pues son aspectos que se reflejan directamente en el consumo energético de la edificación [1].

En este primer capítulo se contextualizan aspectos genéricos sobre herramientas computacionales para el análisis energético de edificaciones, y se describe en mayor detalle la herramienta empleada en este trabajo, *Autodesk Ecotect Analysis*. Se exponen conceptos y herramientas para interpretar los resultados de las simulaciones térmicas, de radiación solar e iluminación natural; y por último, se realiza la descripción de la propuesta de investigación y la estructura de este documento.

1.1. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICACIONES

Las herramientas computacionales de simulación energética de edificaciones permiten realizar análisis térmicos y lumínicos, a fin de evaluar la influencia de características climáticas específicas y diversas alternativas de construcción en las condiciones de operación y, en consecuencia, el comportamiento energético de una edificación [2].

Tal análisis se realiza con base en el BIM de la edificación y las condiciones de su entorno. Esta información se usa para resolver sistemas de ecuaciones que

describen el comportamiento de variables de tipo ambiental y energética en los espacios interiores de la edificación, de acuerdo con las capacidades del software. Los resultados ayudan en las toma de decisiones, respecto al diseño de la edificación, para reducir consumos energéticos (principalmente, de energía eléctrica) [3].

En el proceso de evaluación de una edificación con herramientas computacionales se pueden distinguir tres (3) etapas, introducción de datos, simulación del edificio y análisis de resultados, tal como se ilustra en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Proceso de simulación del comportamiento energético de un edificio con herramientas computacionales [3].

La primera etapa consiste en la definición del BIM, caracterizando la edificación de forma geométrica, constructiva y operacional, al igual que sus sistemas. Después, se realizan las simulaciones térmicas y lumínicas de los parámetros que inciden en los consumos energéticos; finalmente, se hace el análisis de los resultados de las simulaciones para conocer los consumos energéticos del edificio y tomar medidas de control sobre las variables que los afectan [3].

Los programas para la simulación del comportamiento energético de edificaciones permiten analizar varios de los siguientes aspectos: penetración de la luz solar, ventilación, sistemas de energías renovable, ganancias y pérdidas térmicas, temperaturas internas, sistemas y equipos HVAC (*Heat, Ventilation and Air Conditioned Systems*) y emisiones al medio ambiente. En general, estos

programas generan reportes consolidados y/o permiten la exportación de datos para el análisis en detalle con otras herramientas.

Veinte (20) de los programas más importantes para realizar simulaciones energéticas de edificaciones, según el Departamento de Energía de los Estados Unidos, son: BLAST, BSim, DeST, DOE-2.1E, AUTODESK ECOTECH ANALYSIS, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST, DESIGNBUILDER, IDA ICE, IES <VE>, HAP, HEED, PowerDomus, SUREL, TAS, TRACE y TRNSYS [4].

En este trabajo de investigación se usó el programa *Autodesk Ecotect Analysis*, adquirido por la universidad a finales del 2011. Se decidió usarlo considerando que permite realizar varias simulaciones útiles para conocer el comportamiento energético de una edificación, siendo una de las herramientas más usadas para este fin [5].

1.2. AUTODESK ECOTECH ANALYSIS

Autodesk Ecotect Analysis es una herramienta computacional para diseño y análisis de edificaciones a partir de su BIM, considerando desempeño térmico, lumínico, acústico, de sombras, recursos y costos. Permite evaluar diversas opciones de diseño de una edificación a fin de reducir el consumo energético [5].

Esta herramienta cuenta con una interfaz amigable para el usuario y distintas posibilidades de análisis. Las utilidades y herramientas más destacadas de *Autodesk Ecotect Analysis* son:

- Interfaz amigable que facilita el modelado y el intercambio de geometrías complejas [6].
- Permite la importación de geometrías complejas en formatos 3D-CAD como 3DS y DXF, creados con programas más familiares para el modelado como ArchiCAD o AutoCAD [7] y [8].

- Facilita la creación de archivos para usar en programas que complementen los análisis energéticos como *Autodesk Green Building Studio*, *EnergyPlus*, *ESPr*, *HTB-2* y *Radiance* [5].
- Cálculos de sombras y radiación visuales.
- Rango amplio de simulaciones sobre acústica, iluminación y consumo energético [9].
- Entorno gráfico para la visualización de resultados [10].
- Realización de informes sobre el impacto energético en la proceso de diseño [11].

En la Tabla 1.1 se presentan funciones de *Autodesk Ecotect Analysis* para recopilar, presentar y analizar información de edificaciones [12].

Geometría de la edificación	Importación desde aplicaciones CAD y BIM
	Entorno para modelar directamente en Autodesk Ecotect Analysis
Materiales constructivos	Librerías
	Creación de nuevos materiales
Definición de características ambientales	Fecha y hora
	Posicionamiento global
	Datos climáticos
Análisis de sombras	Visualización de sombras exteriores, interiores y sobre objetos particulares
	Mascaras solares y análisis de sitio
	Sun-Path
Análisis de reflexiones	Visualización de reflexiones exteriores, interiores y sobre objetos particulares
Análisis de iluminación	Factor de iluminancia-día usando puntos o grilla de análisis
	Iluminación artificial
	Exportación a RADIANCE
Análisis solar energético	Insolación acumulada
	Envolvente solar
Respuesta acústica	Rayos acústicos
	Tiempos óptimos de reverberación
Respuesta térmica	Temperaturas horarias
	Ganancias y pérdidas de calor horarias
	Desempeño térmico

Tabla 1.1. Funciones de *Autodesk Ecotect Analysis* para recopilar, presentar y analizar la información de edificaciones.

La Figura 1.2 presenta los tipos de simulaciones que permite realizar *Autodesk Ecotect Analysis* (zona izquierda), la información requerida para realizar cada simulación (zona central) y los programas a los que se puede exportar el BIM e

información relacionada, a fin de realizar los análisis más detallados de los aspectos entre paréntesis (zona derecha).

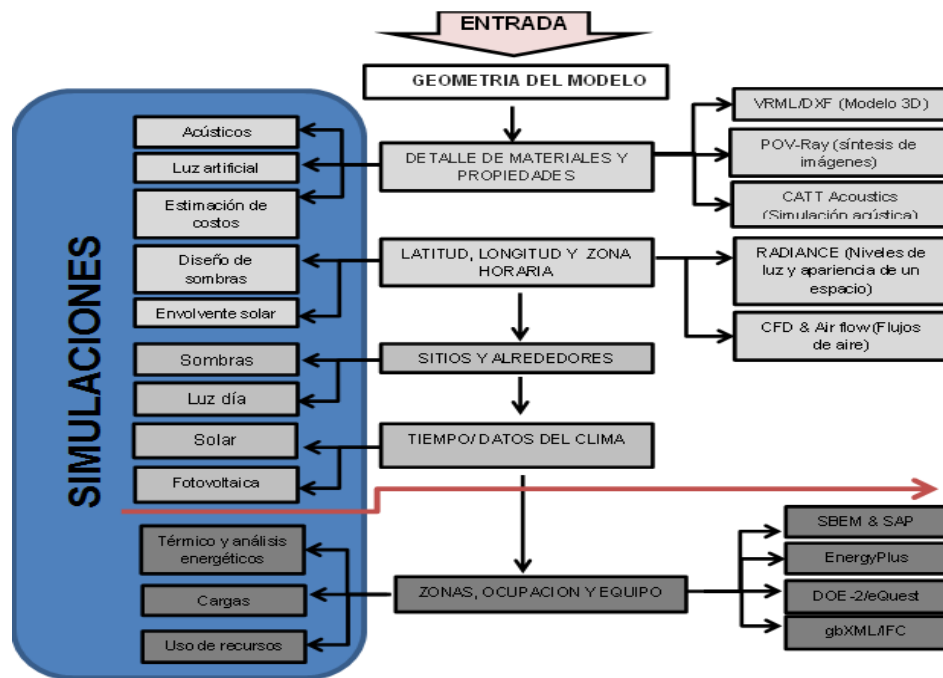


Figura 1.2. Nivel de información y datos requeridos por los diferentes tipos de análisis [13].

Los análisis que se ubican debajo de la línea roja en la de la Figura 1.2 requieren de un modelo de la edificación definido por zonas térmicas². Éste aplica tanto para los análisis que aparecen bajo la línea roja como para análisis de tipo no exhaustivo; es decir, con bajo nivel de detalle en cuanto a la forma y estructura del edificio [13].

Autodesk Ecotect Analysis ha sido usado en proyectos de gran importancia a nivel internacional como una ayuda para tomar decisiones de diseño en edificaciones, con el fin de aprovechar al máximo recursos naturales y condiciones climáticas en la reducción de requerimientos energéticos.

Entre los proyectos más reconocidos se encuentran la Oficina Central de Masdar, inaugurada a finales del 2010 [14], cuyo objetivo es ser un desarrollo con cero desperdicio y cero emisiones de carbono; y, la Base Sostenible de la NASA, terminada a finales del 2011 [15], diseñada con el fin de sobrepasar los criterios

² Representación simplificada que contiene toda la información sobre cada espacio interior, tal como volumen, materiales y adyacencias [13].

para obtener una certificación LEED Platino³, aproximándose al cero consumo de energía.

1.3. SISTEMA DE CERTIFICACIÓN LEED

El sistema de certificación LEED (Acrónimo de *Leadership in Energy & Environmental Design*) tiene como objetivo avanzar en la utilización de estrategias que permitan reducir el impacto medioambiental de la industria de la construcción [16].

Se basa en la incorporación al proyecto de aspectos relacionados con la eficiencia energética, el uso de energías alternativas, la mejora de la calidad ambiental interior, la eficiencia del consumo de agua, el desarrollo sostenible de los espacios libres y la selección apropiada de materiales [16].

Si bien el sistema de certificación LEED fue pensado para el caso de edificaciones en Estados Unidos, coincide en varios puntos con la regulación ambiental colombiana, y puede ser usado como un estándar o guía para reducir el impacto ambiental que generan las edificaciones en el país [17].

En el capítulo 7 de este documento se explica con más detalle en qué consiste el sistema de certificación LEED y se realiza una pre-evaluación de la sostenibilidad energética del EEEIE teniéndolo en cuenta.

1.4. CONFORT TÉRMICO

La norma ISO 7730 define el confort térmico como "aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico" [16]. Para que esto ocurra, se deben cumplir tres condiciones. En primer lugar, la ecuación del balance térmico (Ecuación 1); es decir, debe existir un equilibrio entre la ganancia de calor, ambiental o metabólico, y la eliminación del mismo [17].

³ Sistema de certificación de edificios sostenibles desarrollado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos [21]. En el numeral 1.3 se define con más profundidad.

$$M \pm Rd \pm Cv \pm Cd - Ev = \Delta S \text{ (Ec. 1.1)}$$

Donde M = producción metabólica de calor
 Rd = Intercambio de radiación neta
 Cv = Convección (Incluyendo respiración)
 Cd = Conducción
 Ev = Evaporación (Incluyendo respiración)
 ΔS = Cambio en el calor almacenado

En segundo lugar, se requiere que no haya discomfort local en ninguna parte del cuerpo humano, como radiaciones térmicas asimétricas, corrientes de aire, pisos fríos o calientes, o diferencias verticales de temperaturas del aire [18].

En tercer lugar, la temperatura de la piel y la cantidad de sudor evaporado deben estar comprendidas entre ciertos límites [17]. Los estudios de Fanger⁴ demostraron que los valores de la temperatura de la piel y de la cantidad de sudor secretado en las situaciones confortables dependen del nivel de actividad a través de relaciones lineales; la temperatura de la piel es linealmente decreciente con el consumo metabólico; mientras, la cantidad de sudor evaporado crece linealmente con la actividad, siempre en el supuesto de hallarnos en situaciones confortables [19].

Las variables que determinan el confort térmico percibido por una persona afectan la tasa de disipación de calor del cuerpo, y se pueden agrupar en factores ambientales, personales y otros, tal como muestra la Figura 1.3 [20].

⁴ P.O. Fanger propuso en 1973 el método Fanger para la valoración del confort térmico, en la publicación *Thermal Comfort* (New York, McGraw-Hill, 1973). Este método es en la actualidad uno de los más extendidos para la estimación del confort térmico. La importancia y aplicación generalizada del método se debe principalmente a su inclusión como parte de la norma ISO 7730 relativa a la evaluación del ambiente térmico.

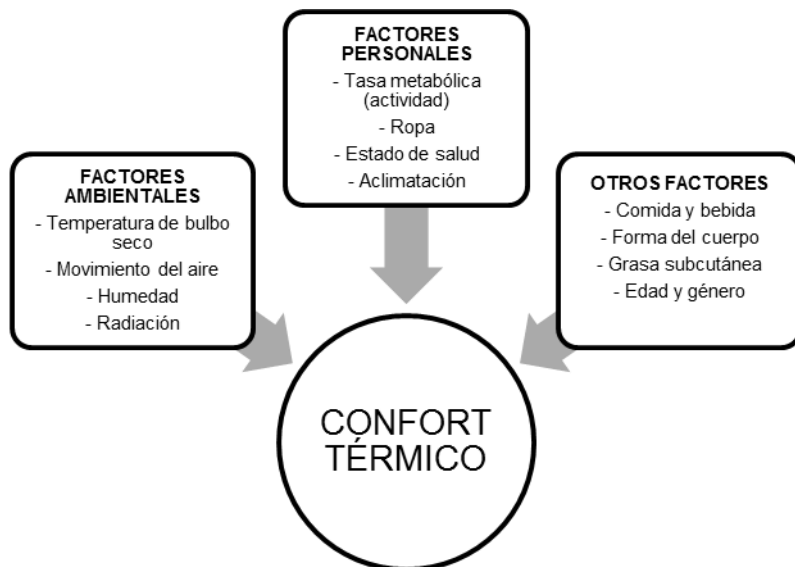


Figura 1.3. Factores que inciden en el confort térmico.

El confort térmico puede predecirse de varias maneras, entre las que se encuentra el modelo de balance de energía en estado estable, recomendado por el estándar ISO 7730⁵, y los modelos adaptativos, en los cuales *Autodesk Ecotect Analysis* basa su cálculo [21].

El modelo de balance de energía en estado estable es un modelo matemático de la psicología térmica humana, calibrado a partir de las sensaciones de calor reportadas por las personas durante experimentos en espacios con clima controlado. Para ello, se definen dos índices, el voto medio previsto PMV (*Predicted Mean Vote*) y el porcentaje de no satisfacción PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*), especificados en el ANEXO B.

Los modelos adaptativos no predicen la respuesta al confort sino las condiciones constantes bajo las cuales las personas se sentirán cómodas en una edificación. Estos modelos reconocen la capacidad de las personas para adaptarse naturalmente y hacer ajustes a ellos mismos o a sus alrededores para reducir el desconfort. Las acciones adaptativas pueden ser cambios de ropa, postura, horarios de actividades, tasa de trabajo, dieta, ventilación y temperatura local. Según estudios, a través de acciones adaptativas se puede lograr un grado

⁵ Estándar internacional que se titula "Ergonomía del ambiente térmico - Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y locales criterios de confort térmico"

aceptable de confort en residencias y oficinas con temperaturas entre 17°C y 31°C.

Las condiciones climáticas son el principal factor considerado por los modelos adaptativos, porque son las variables más importantes en el proceso de adaptación. Se usa la temperatura de bulbo seco media mensual para predecir las temperaturas de confort o los rangos de temperaturas de confort. Los modelos se obtienen a partir de los datos que arrojan estudios de confort.

Autodesk Ecotect Analysis permite considerar el confort térmico con los siguientes modelos adaptativos, descritos en el ANEXO C:

- Temperatura de neutralidad térmica (*Auliciems*)
- Confort adaptativo con ventilación natural (*Michael Humphrey*)
- Confort adaptativo de sistemas desconocidos (*Humphrey y Nicol*)

1.5. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo de este trabajo de grado se basa en una metodología definida en el mismo, cuyo objetivo particular es la cuantificación del nivel de aprovechamiento de las condiciones en sitio del Edificio de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales (EEEIE). Para ello, se soporta en simulaciones de comportamiento energético con el software *Autodesk Ecotect Analysis* y se realiza una evaluación del EEEIE, teniendo en cuenta la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED V3.0. Debido a la complejidad y al tiempo requerido para la ejecución del análisis energético propuesto, se plantea su desarrollo en tres partes, siguiendo la metodología conformada por cinco (5) fases.

En el presente trabajo de grado se realizan las tres primeras fases: (i) creación del BIM del EEEIE, (ii) selección de puntos críticos de potencial mayor influencia en los consumos energéticos y (iii) pre-análisis de variables que inciden en el

consumo energético de la edificación y del cumplimiento de la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED.

Las fases (iv) calibración del modelo de información del edificio y (v) simulación y análisis se propone sean desarrolladas en al menos dos trabajos de grado posteriores.

Por tanto, se plantea como objeto de esta investigación la creación del BIM del EEEIE, y la identificación de puntos críticos para realizar simulaciones de *Autodesk Ecotect Analysis*, relacionadas con factores que inciden en el consumo energético de la edificación; así como, realizar una pre-evaluación según los lineamientos de análisis energético establecidos en el estándar LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*) de la sección *Energy and Atmosphere*.

Esto se soporta en los siguientes objetivos específicos:

- Establecer una metodología para el análisis energético de edificaciones a partir del software *Autodesk Ecotect Analysis*.
- Crear el *Building Information Modelling* (BIM) del Edificio de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales (EEEIE).
- Crear una base de datos de las condiciones micro-climáticas en sitio compatible con *Autodesk Ecotect Analysis*.
- Identificar puntos críticos al interior de la edificación que potencialmente sean de mayor influencia en el consumo de energía eléctrica.
- Establecer una guía para la interpretación de los resultados de las simulaciones potenciales a obtenerse con *Autodesk Ecotect Analysis*.

La Tabla 1.2 presenta el alcance de cada uno de los objetivos:

OBJETIVO ESPECIFICO	ALCANCE
N°1: Establecer una metodología para el análisis energético de edificaciones a partir del software <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	El desarrollo de este proyecto permitirá la creación de una metodología para realizar análisis energéticos a edificaciones, se planteará a través fases y etapas, se hará el respectivo planteamiento y se darán lineamientos para la potencial ejecución de las mismas.
N°2: Crear el <i>Building Information Modelling</i> (BIM) del Edificio de Estudios Industriales y Empresariales (EEIE)	Este modelo 3D tendrá en cuenta las características de los espacios interiores de la edificación (dimensiones, materiales, distribución espacial); asimismo, se modelarán los edificios aledaños, obstrucciones y demás elementos que afecten el comportamiento de la edificación.
N°3 Crear una base de datos de las condiciones microclimáticas en sitio compatible con <i>Autodesk</i>	El modelo BIM podrá ser utilizado para ejecutar cualquier tipo de simulación a través del software <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> , pero ello, es necesaria la creación de una base de

Ecotect Analysis	datos de las variables micro climáticas (temperatura de bulbo seco [°C], humedad relativa [%], relación de humedad [g/kg], temperatura de punto de rocío [°C], velocidad del viento [m/s], dirección del viento [°E of N], irradiación solar normal directa [W/m ²], irradiación solar horizontal global [W/m ²], irradiación solar difusa horizontal [W/m ²], nubosidad [fracción], precipitación [mm]) en el campus central de la universidad.
N°4 Identificar puntos críticos al interior de la edificación que potencialmente sean de mayor influencia en el consumo de energía eléctrica	Se identificarán <i>a priori</i> , puntos críticos al interior de la edificación de mayor influencia en el consumo de energía eléctrica a partir de variables cualitativas (como áreas, ocupación, número de personas, etc.), para luego realizar las simulaciones que tengan mayor incidencia en los consumos energéticos, a partir de las cuales se analizan diversos aspectos, tales como sistemas HVAC, radiación solar e iluminación natural.
N°5 Establecer una guía para la interpretación de los resultados de las simulaciones potenciales a obtenerse con Autodesk Ecotect Analysis	Se desarrollará una guía que facilite la interpretación de simulaciones térmicas, de iluminación natural y radiación solar que genere el software, y de esta manera dar recomendaciones a tener en cuenta en los diseños de bajos consumos energéticos.

Tabla 1.2. Alcance de los objetivos específicos.

1.6. ESTRUCTURA DEL REPORTE DE INVESTIGACIÓN

Se pueden observar cuatro bases o criterios necesarios para el adecuado desarrollo de la propuesta de investigación, relacionados con cada uno de sus siete (7) capítulos (2 a 8) de la manera indicada en la Figura 1.4: (i) fundamentación teórica para interpretar las graficas generadas por la herramienta computacional y plantear la metodología; (ii) creación del BIM del EEEIE con el cual se realizan las simulaciones para seleccionar puntos críticos a tener en cuenta en el posterior proceso de calibración, plantear guía de interpretación de resultados de *Autodesk Ecotect Analysis* y pre-evaluación LEED; (iii) manejo del software *Autodesk Ecotect Analysis* y simulaciones que permiten plantear la guía de interpretación de resultados, identificar puntos críticos y pre-evaluación LEED; y (iv) el estándar LEED-EB (V3.0) necesario para realizar la pre-evaluación al edificio.

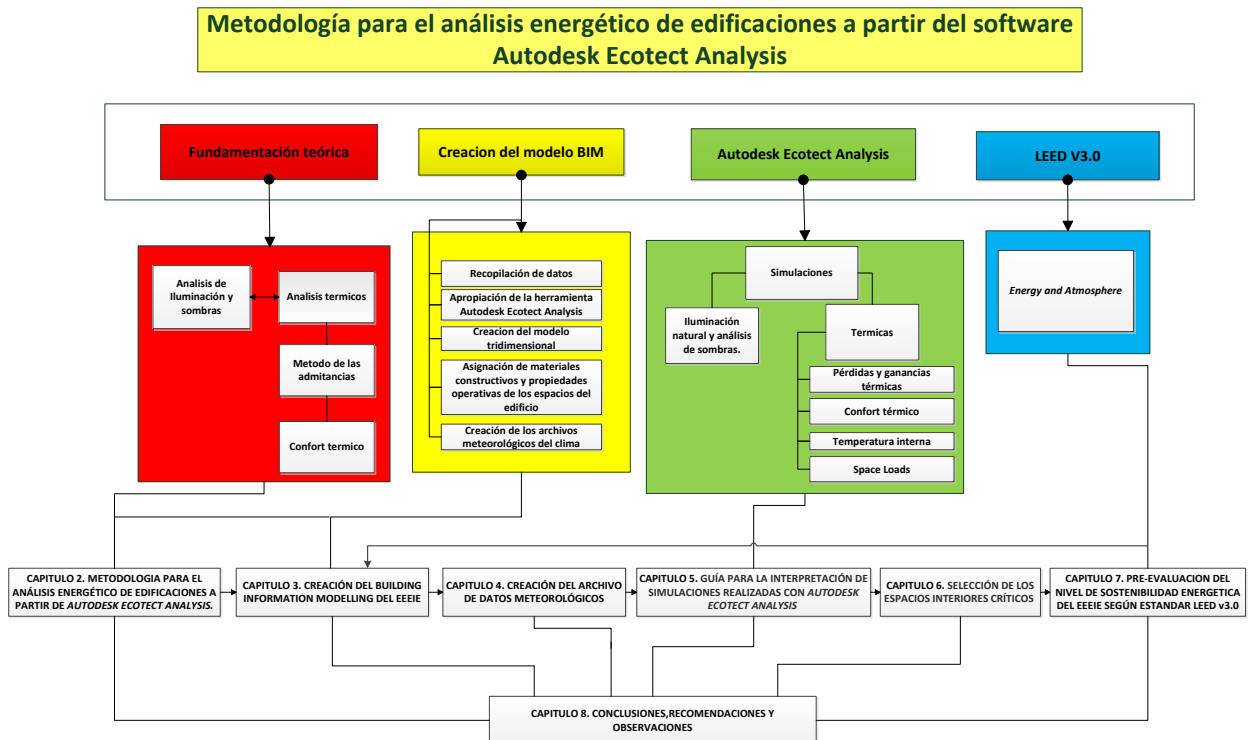


Figura 1.4. Descripción del contenido del reporte del trabajo de investigación.

El presente capítulo no aparece en el gráfico anterior pues no se relaciona directamente con la ejecución del proyecto, sino que sirve para familiarizar al lector con conceptos necesarios para seguir más fácilmente su desarrollo, comprender su estructura y alcance.

El capítulo 2 expone y explica las diferentes fases de la metodología propuesta para el análisis energético del EEEIE según lineamientos LEED, apoyándose en el manejo de la herramienta software y su apropiamiento.

El capítulo 3 detalla el proceso de creación de la edificación, adjuntando las características intrínsecas a la construcción y funcionamiento de la misma. Se usan los datos recopilados acerca de la edificación, y el programa *Autodesk Ecotect Analysis*, además de otras herramientas como *Graphisoft ArchiCAD* y *Google Sketch Up 8*. En el capítulo 4, se describe el proceso de constitución del archivo de datos meteorológicos asociado al EEEIE.

En los capítulos 5 y 6 se estructura una guía para la interpretación de las simulaciones térmicas, de radiación solar e iluminación natural realizadas con *Autodesk Ecotect Analysis*, y se identifican los espacios interiores críticos del EEEIE.

En el capítulo 7 se evalúa *a priori*, el nivel de sostenibilidad energética del EEEIE según el estándar LEED V3.0 teniendo en cuenta lineamientos que establece la categoría *Energy and Atmosphere*.

Finalmente, en el capítulo 8, se presentan las conclusiones, recomendaciones y observaciones pertinentes, extraídas del trabajo de grado.

Referencias Bibliográficas

- [1] Comisión Europea. Edificios mejores: La nueva normativa europea para ahorrar energía. [En línea] Disponible en: http://www.energyefficiency.basf.com/ecp1/EnergyEfficiency/en/function/conversions:/publish/upload/pdf/leaflet_better_buildings_es.pdf.
- [2] Construdata, «Construcción sostenible, materiales y sistemas,» vol. Julio – Diciembre, nº Segunda Edición, 2010.
- [3] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Las energías renovables a ambos lados de la raya,» Diciembre de 2008.
- [4] D. Crawley, J. Hand, M. Kummert y B. Griffith, «Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs,» 2005. [En línea]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf. [Último acceso: 19 Mayo 2012].
- [5] Crawley, Drury B.; Hand, Jon W; Kummert, Michaël; Griffith, Brent T, «Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Versión 1.0,» Julio 2005. [En línea].
- [6] R. Keleher, Parametric Daylighting/Energy Modeling Software, Building Envelope Forum.
- [7] Autodesk, Inc, Autodesk Ecotect Analysis: Questions and Answers, [En línea] Disponible en: http://www.sistemaconsultores.com/software/autodesk/ecoa/ecotectanalysis10_faq_customer_sc.pdf, 2009.
- [8] US Department of Energy, «Building Energy Software Tools Directory - Ecotect,» [En línea]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=391/pagename=alpha_list_sub.
- [9] Autodesk, Inc, Autodesk Ecotect Analysis: Visualize sustainable design, [En línea] Disponible en: http://images.autodesk.com/adsk/files/autodesk_ecotect_analysis_2011_brochure.pdf, 2010.
- [10] Architect: The magazine of the american institute of architects, «Virtual performance,» Octubre 2010. [En línea]. [Último acceso: 25 Febrero 2012].
- [11] Civil Engineer Group: The world of civil engineer and civil engineering, «Greener Buildings Through Energy Analysis Tools,» Enero 2011. [En línea]. Available: <http://blog.civilengineergroup.com/greener-buildings-energy-analysis-tools.html>.
- [12] Herrera, Gastón, Curso Ecotect 5.5, Santiago de Chile: Archisoft. [En línea] Disponible en: <http://ecotectchile.blogspot.com/>, 2007.
- [13] Graphisoft R&D Zrt. Reference Manual: Preparing ArchiCAD Models for Analysis in Ecotect. 2008. [En línea] Disponible en: http://download.graphisoft.com/ftp/download/ecotect/ArchiCAD_Model_Preparation_for_Ecotect.pdf.

- [14] Autodesk, Inc, Capitalize on green design, [En línea] Disponible en: http://images.autodesk.com/adsk/files/masdar_headquarters_project_customer_story.pdf, 2010.
- [15] Autodesk, Inc., Communicate across barriers, [En línea] Disponible en: http://images.autodesk.com/adsk/files/nasa_sustainability_base_customer_story.pdf, 2010.
- [16] Wikipedia: La enciclopedia libre, «LEED,» 8 Agosto 2012. [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/LEED>. [Último acceso: 18 Octubre 2012].
- [17] J. P. Espinosa y D. Echeverry, «Aplicabilidad del sistema LEED en el entorno colombiano,» [En línea]. Available: http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/198/mi_1036.pdf?sequence=1. [Último acceso: 18 Octubre 2012].
- [18] Kvisgaard, Bjorn. Thermal comfort. INNOVA Air tech instruments. Denmark. 1997. [En línea] Disponible en: <http://www.innova.dk/books/thermal/>.
- [19] Ministerio de trabajo y asuntos sociales - Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. NTP 501: Ambiente térmico: Inconfort térmico local. España. , [En línea] Disponible en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_501.pdf . Fecha de consulta: Mayo 14 de 2012.
- [20] CIBSE. CIBSE Guide A: Environmental design. Septima edición. 2006.
- [21] Ministerio de trabajo y asuntos sociales - Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. NTP 74: Confort térmico - Método de Fanger para su evaluación. España. , [En línea] Disponible en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_074.pdf . Fecha de consulta: mayo 14 de 2012.
- [22] Szokolay, Steven V. Introduction to architectural science: The basis of sustainable design. Elsevier Ltd. Segunda edición. Oxford. 2008 .
- [23] ASHRAE. ASHRAE Fundamentals: Thermal comfort. 2009.

2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES A PARTIR DE AUTODESK ECOTECH ANALYSIS

Este capítulo presenta la propuesta metodológica para analizar energéticamente edificaciones, ilustrada en la Figura 2.1 donde se puede visualizar una estructura soportada en cinco (5) fases. Cada fase está conformada por etapas, para un total de veinte (20).

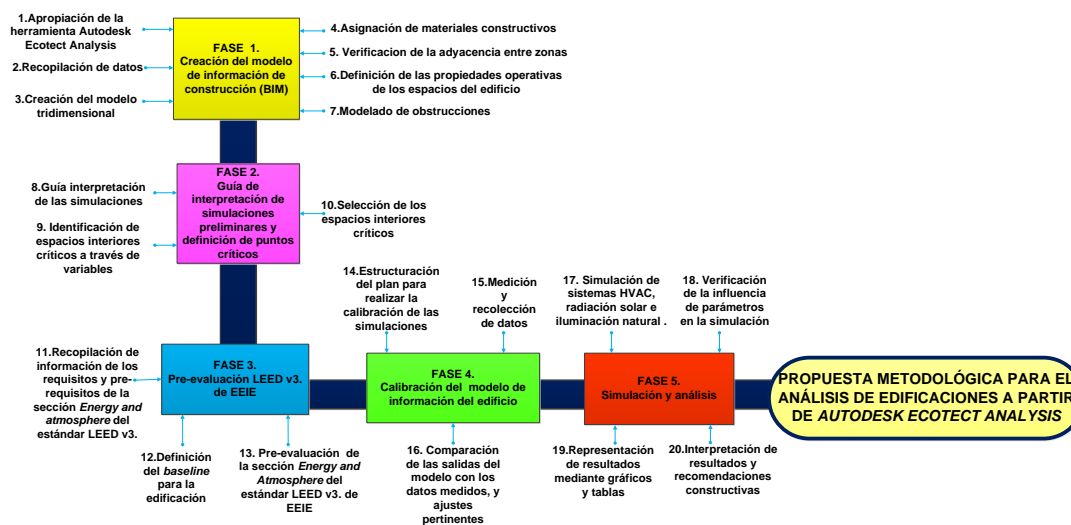


Figura 2.1. Fases y etapas de la metodología propuesta.

Esta metodología presenta una estructura secuencial que inicia con la creación del modelo BIM y finaliza con la evaluación energética del edificio, centrándose en análisis térmicos, radiación solar e iluminación natural, basándose en simulaciones realizadas en el software *Autodesk Ecotech Analysis*.

2.1 FASE 1. CREACIÓN DEL MODELO DE INFORMACIÓN DE EDIFICACIÓN (BIM)

Esta primera fase cuenta con seis (6) etapas, inicia con la apropiación del software *Autodesk Ecotect Analysis*, donde se busca un primer acercamiento a la herramienta con la finalidad de adquirir destrezas y habilidades para su manejo; luego se recopila la información para dar inicio a la creación del modelo tridimensional directamente en el software, o importándolo desde otra herramienta. Una vez se tiene el modelo base, se procede a la asignación de los materiales constructivos; y por ultimo, se definen las propiedades operativas de cada zona y el modelado de las obstrucciones.

2.1.1 Estudio de la herramienta *Autodesk Ecotect Analysis*

Inicialmente, se debe ahondar en el manejo de la herramienta de modelado, especialmente, la manera en que se realiza la asignación de materiales y se establecen relaciones entre elementos, los tipos de simulaciones que se pueden ejecutar y la información de entrada requerida.

Para ello, se debe realizar la exploración de *Autodesk Ecotect Analysis*, a partir de la ayuda del software, manuales y publicaciones relacionadas.

En esta etapa se definirá el proceso para la creación del BIM y las simulaciones requeridas para conocer el comportamiento energético de la edificación.

2.1.2 Recopilación de datos

Para crear el BIM es necesario contar con información detallada de la edificación real, la cual se describe en la Tabla 2.1.

FORMA DE LA EDIFICACIÓN	Se hace referencia a la forma exterior de la fachada, donde se observa la existencia de pórticos, volados en las ventanas o en las puertas, miradores y de cualquier tipo de arreglo que haga parte de la estructura externa del edificio.
ESTRUCTURA ARQUITECTÓNICA	Se refiere a cada uno de los elementos constitutivos del edificio, tales como paredes, ventanas, puertas y huecos de los cuales se deben tener los datos de las dimensiones, y del grosor. Se busca toda esta información en planos 2D o 3D donde se pueda visualizar la estructura arquitectónica del edificio
MATERIALES	Se debe tener los datos de todos los materiales que componen cada uno de los elementos constructivos del edificio, así como sus propiedades térmicas. El listado completo de las propiedades de cada material aparece en la sección Asignación de materiales constructivos del Capítulo 3.
OCUPACIÓN DE LAS ZONAS	Se debe saber el número máximo de personas que van a ocupar cada zona, y el tipo de actividad que se realiza.

TIPO DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN	Se debe conocer el tipo de sistema HVAC, la eficiencia y los horarios de operación.
EQUIPOS ELECTRÓNICOS	Los parámetros a obtener son la potencia consumida, la cantidad de equipos y el horario de uso.
OBSTRUCCIONES ALEDAÑAS	Se debe buscar planos de localización en los que se observen edificios aledaños que impidan que la radiación solar y los vientos incidan directamente, además de señalar los árboles y demás obstrucciones presentes.

Tabla 2.1. Información necesaria en la recopilación de datos.

En esta etapa se deben recopilar y extraer los datos descritos anteriormente a partir de visitas a la edificación, mediciones, documentación existente, como por ejemplo planos arquitectónicos y especificaciones técnicas.

2.1.3 Creación del modelo tridimensional de la edificación

Para dar inicio al proceso de simulación en *Autodesk Ecotect Analysis*, se debe establecer la representación 3D de la edificación bajo análisis, a partir de la cual se considera el efecto de aspectos constructivos en los comportamientos térmicos o lumínicos.

Esta representación puede llevarse a cabo a partir de zonas térmicas⁶ o de zonas geométricas⁷. Lo más recomendable es usar zonas térmicas, dado que permiten realizar la mayoría de simulaciones [1].

A partir de la información recopilada se traza el modelo 3D usando uno de los software compatibles con *Autodesk Ecotect Analysis*, como por ejemplo *Graphisoft ArchiCAD* o *Autodesk Revit Architecture*. La información sobre la estructura tridimensional de la edificación se obtiene a partir de planos arquitectónicos y otros documentos en los que se especifiquen detalles de su diseño.

Una vez el modelo ha sido creado, en una herramienta diferente a *Autodesk Ecotect Analysis*, se importa y se verifica si se presentan problemas en el reconocimiento de elementos. De ser así, se realiza la corrección al modelo importado, ajustando los elementos constructivos con las opciones que el software ofrece. De lo contrario, el modelo se encuentra terminado.

En la Figura 2.2. se observa el diagrama de flujo donde se esquematiza el procedimiento para crear el modelo 3D de la edificación. El primer paso es definir la complejidad del modelo, ya que se tienen dos opciones, la primera es crearlo directamente en el entorno

⁶ Representación simplificada de cada área del edificio, definida como un volumen cerrado de aire homogéneo que contiene la información sobre su volumen, materiales y adyacencia con las demás zonas definidas [1].

⁷ El modelo se hace basado en superficies que incluyen toda la información relacionada con la forma del edificio, pero no distingue los materiales de los elementos ni su naturaleza [1].

de *Autodesk Ecotect Analysis*, a través de las herramientas básicas, como particiones, zonas, planos, techos, ventanas y puertas; sin embargo, éstas no prestan todas las funciones de modelado adecuadas para el manejo de edificaciones complejas [1]. Es por eso que, en el caso de edificaciones complejas, se aplica la segunda opción, crearla a través de una aplicación especializada en la construcción de modelos BIM [1], como por ejemplo *Graphisoft ArchiCAD* o *Autodesk Revit Architecture*.

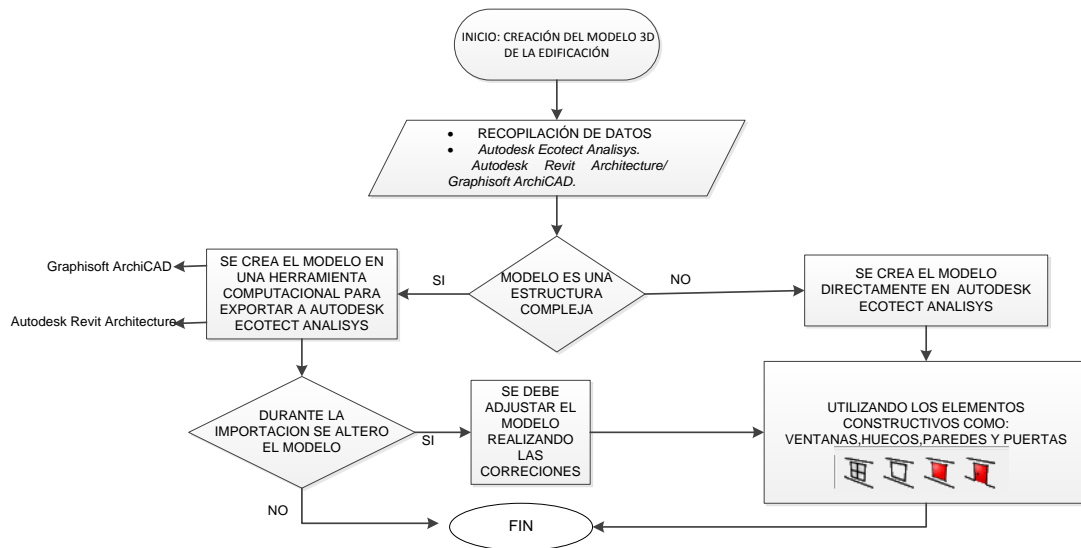


Figura 2.2. Diagrama de flujo de la creación del modelo 3D de la edificación.

2.1.4 Asignación de los materiales constructivos

Los materiales de los elementos que constituyen una edificación, como ventanas, muros, puertas, pisos y techos, determinan su comportamiento acústico, térmico y visual; por lo que, asignarlos correctamente es vital para ejecutar las simulaciones.

La asignación de materiales puede realizarse durante el proceso de modelado del edificio, y previamente a su importación a *Autodesk Ecotect Analysis*, si el programa lo permite, como es el caso *Autodesk Revit* y *Graphisoft ArchiCAD*. *Autodesk Ecotect Analysis* asigna materiales similares a los predefinidos, según sus librerías.

Posteriormente, se debe verificar si los materiales poseen las características necesarias para simular de manera aproximada el comportamiento visual y térmico real. Si ningún material cumple con las características requeridas, se pueden modificar sus propiedades térmicas y visuales para crear nuevos materiales.

Finalmente, se debe tener presente que *Autodesk Ecotect Analysis* requiere la definición de dos materiales para cada elemento, uno primario y otro alternativo. El material primario es el que constituye el elemento, y el material alternativo corresponde al material del elemento adyacente⁸ a éste.

2.1.5 Verificación de adyacencia entre zonas térmicas

Dos zonas térmicas se consideran adyacentes si están una al lado de la otra y comparten elementos. Al definir dos zonas como adyacentes, *Autodesk Ecotect Analysis* entiende que entre ellas puede ocurrir un flujo térmico.

Uno de los requisitos para ejecutar cualquier simulación en *Autodesk Ecotect Analysis*, es realizar previamente el cálculo de las adyacencias. Si las zonas del modelo no se encuentran bien definidas, se presentan errores que no permiten que se ejecute el proceso; por ello, éstas deben estar completamente cerradas, y las superficies adyacentes deben ser paralelas y tener el mismo material alternativo.

Al definir las zonas térmicas a partir de los muros internos de cada espacio interior, existe una separación entre zonas adyacentes que podría dar cabida a un flujo de aire. Para evitarlo, se define la tolerancia de adyacencia que es la máxima distancia a la que pueden separarse en el modelo [2].

En la Figura 2.3 se tienen dos zonas contiguas trazadas a partir del contorno interno del aula, por lo que la distancia entre ellas, **a**, es equivalente al grosor del muro. Para que no haya flujo de aire entre estas zonas, se debe definir una tolerancia de adyacencia igual a **a**. Al hacer esto, *Autodesk Ecotect Analysis* interpretará que las superficies adyacentes son el mismo elemento, como se muestra en la Figura 2.4 esta el muro 2, compartido por la zona 1 y la zona 2, se considera adyacente, pues la distancia **a** que separa las dos zonas es igual o menor que la tolerancia de adyacencia definida.

⁸ Elemento cercano y paralelo.

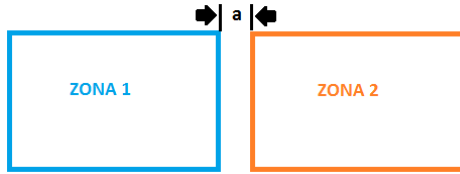


Figura 2.3. Separación entre zonas al definir las usando el contorno interno del aula - Vista lateral.

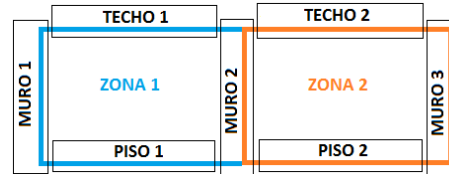


Figura 2.4. Forma en que Autodesk Ecotect Analysis interpreta el elemento adyacente (Muro 2).

2.1.6 Definición de condiciones de operación de las zonas térmicas

Una zona térmica es una representación simplificada de cada área de una edificación, definida como un volumen cerrado de aire homogéneo que contiene la información sobre volumen, materiales y adyacencia con las demás zonas definidas [1].

Las condiciones de operación de una zona térmica son aquellas que inciden principalmente en el confort térmico y la calidad del aire interior. Se definen a partir de la especificación de [3]:

- *Condiciones internas de diseño:* valores de los parámetros considerados para establecer el confort térmico y lumínico de la zona. Se debe tener en cuenta la ropa que usan sus ocupantes y la humedad, velocidad del aire y nivel de iluminación adecuados.
- *Ocupación:* establece el número máximo de personas que pueden estar dentro de la zona, y la disipación biológica promedio de acuerdo a la actividad que realicen.
- *Ganancias internas de calor:* se definen a partir de las ganancias sensibles y latentes, y el horario de ocurrencia. Autodesk Ecotect Analysis no considera las ganancias latentes en las simulaciones, pero se pueden definir posteriormente cuando se vaya a exportar el modelo.
- *Tasa de intercambio de aire:* se refiere al movimiento de aire entre una zona y el ambiente exterior. Para ello, se deben especificar la tasa de renovaciones de aire, sensibilidad del aire y un horario.
- *Tipo de sistema de climatización (HVAC):* se define el sistema HVAC, la eficiencia y el horario de operación.
- *Rango de temperaturas de confort:* se usa para determinar si se tiene una temperatura adecuada al interior de una zona y para operar los sistemas HVAC.

En el ANEXO D se definen con mayor detalle los parámetros relacionados con las condiciones de operación de una zona térmica.

2.1.7 Modelado de obstrucciones y otros aspectos complementarios

Las obstrucciones son los objetos aledaños al edificio que impiden que la radiación solar y los vientos incidan directamente en las fachadas [4]. Los objetos que producen un efecto considerable en el comportamiento térmico o lumínico del edificio, son aquellos de un tamaño similar y que se encuentran suficientemente cerca a la edificación [5]. Se pueden modelar sin necesidad de un proceso exhaustivo para definir cada objeto aledaño a la edificación [3].

Los aspectos complementarios se refieren a otras variables que contribuyen a la definición del modelo de la edificación, como localización, orientación y suelo del edificio.

La localización requiere especificar la posición geográfica (latitud y longitud) y la región en la que se ubica la construcción, lo cual determina las condiciones macro y micro-climáticas del sitio; así como, las obstrucciones (edificaciones ó árboles) que interactuarán con el edificio de interés [3].

La orientación de la edificación influye principalmente sobre la forma en que llegan la radiación solar y los vientos [3].

El efecto del suelo y el relieve adyacente a un edificio puede modificar su microclima característico; y por tanto, variar los resultados de simulaciones térmicas y lumínicas. El relieve cercano se puede considerar a partir de las alturas, relativas a la edificación, de los objetos adyacentes como árboles y edificios cercanos [3].

El suelo adyacente al edificio puede afectar su comportamiento lumínico al reflejar parte de la radiación solar que incide en él, u obstruir parte de los rayos solares que llegan en caso de que algún piso se encuentre por debajo del nivel del suelo. Térmicamente, como la temperatura de la tierra es diferente a la del interior de una edificación se pueden generar flujos de calor que deben ser considerados [3].

2.2 FASE 2. GUIA DE INTERPRETACIÓN DE SIMULACIONES PRELIMINARES Y DEFINICIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS

El desarrollo de la fase dos inicia con el proceso de selección de las simulaciones a considerar para los análisis de los consumos energéticos, una vez identificadas se elabora una guía de interpretación, que permitirá entender los gráficos o curvas arrojados por *Autodesk Ecotect Análisis*. En ella se encontrará información de cada una de las variables asociadas y de los métodos de cálculo.

En esta fase, se desarrolla también la selección de los espacios interiores críticos, basándose principalmente en las características particulares y comportamientos presentados en las simulaciones.

2.2.1 Guía de interpretación de las simulaciones

El software *Autodesk Ecotect Analysis* presenta una gran variedad de simulaciones; por lo tanto, se hace necesario llevar a cabo un proceso de selección para elegir aquellas que permiten analizar los consumos energéticos de las edificaciones, por ejemplo las simulaciones térmicas, de iluminación natural, y de radiación solar.

Durante la ejecución de esta Etapa, se realizan las simulaciones a espacios interiores de la edificación. Dependiendo de la complejidad de la edificación, puede resultar más conveniente tomar un espacio interior único que reúna todas las características y permita desarrollar las simulaciones, y de éstas elaborar una guía de interpretación.

Esta guía será un compendio de todas las simulaciones que se ejecuten. Se centrará en explicar los métodos de cálculo utilizados por *Autodesk Ecotect Análisis*, las gráficas arrojadas y se analizará la coherencia entre los datos obtenidos y los esperados.

A pesar de que el modelo no se encuentra calibrado, se ejecutan las simulaciones para obtener unos resultados predictivos del comportamiento del edificio y de esta manera tener criterios para seleccionar los espacios interiores críticos.

2.2.2 Identificación de espacios interiores críticos a través de variables

La identificación de espacios interiores críticos es un proceso en el que se van a seleccionar aquellas zonas que, por sus características particulares, merecen ser calibradas y posteriormente analizadas a través de las simulaciones.

El procedimiento empieza por enlistar todos los espacios interiores que conforman el edificio bajo estudio, en caso de tener una edificación compleja se agruparán los espacios por nivel. Una vez identificadas las zonas se ordenan en una matriz, un prototipo a utilizar es el mostrado en el ANEXO E, en donde se enumeren las zonas que conforman la edificación, y se enlisten los criterios que permitirán evaluar las condiciones de temperatura e iluminación más drásticas.

Los principales aspectos que influyen en el comportamiento energético de una edificación son fachada en que se encuentra, tiempo de uso, ocupación, uso de iluminación artificial, utilización de aire acondicionado, área del espacio interior y, si tiene, ventanas y cortasoles.

Una vez reunidas las variables de cada espacio interior, se realiza una pre-selección cualitativa y cuantitativa, teniendo en cuenta que las características presentadas se relacionan con su comportamiento térmico y lumínico. Los espacios preseleccionados serán analizados a través de simulaciones y finalmente seleccionar los espacios interiores a considerarse críticos.

Por ejemplo, un potencial espacio interior crítico será en el que se encuentren gran cantidad de equipos de cómputo, o se encuentre ubicado en fachadas que posean radiación solar directa durante todo el día. La metodología desarrollada puede ser aplicada a cualquier edificación, es por eso, que definir las zonas críticas para simular, depende principalmente de aquello que se desee evaluar dentro del diseño

2.2.3 Selección de los espacios interiores críticos

La identificación de los espacios interiores críticos, tiene como finalidad definir los espacios que van a ser calibrados en la siguiente fase.

Al finalizar la etapa anterior se tiene un listado de espacios, resultados de una pre-selección. El paso a seguir es reducir ese número a los que son realmente críticos, para lo

cual se deben efectuar simulaciones preliminares del modelo sin calibrar, se analizan los resultados y se toman los espacios que presentan las condiciones más críticas dentro de cada simulación.

Por ejemplo, se ejecutarán las simulaciones de radiación solar a todos los espacios seleccionados; la herramienta se configura con los datos de operación de cada zona, con las respectivas propiedades de los materiales y demás ajustes necesarios que requiera el software; luego, se ejecutan las simulaciones y se evalúan los resultados preliminares para tomar las zonas que presenten mayor o menor radiación solar, que se encuentren en fachadas críticas o por su ubicación arrojen resultados no esperados.

A pesar de que el modelo no se encuentre calibrado, es necesario realizar las simulaciones; ya que éstas brindan la posibilidad de conocer el comportamiento energético de las zonas y la operación que se tiene para cada espacio interior.

2.3 FASE 3. PRE-EVALUACIÓN LEED V3.0

En esta fase de la metodología se realiza una pre-evaluación LEED V3.0, tomando sólo la sección *Energy and Atmosphere* (debido a su relación directa con el desempeño energético de la edificación), donde se valora la reducción de los consumos de energía y el incremento en el uso de energías renovables.

2.3.1 Recopilación de información de los requisitos y pre-requisitos de la sección *Energy and Atmosphere*

Para realizar la pre-evaluación de la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED V3.0, es necesario conocer previamente los prerrequisitos y requisitos que se deben satisfacer. El objetivo de esta etapa es la recopilación de dicha información.

Con esto se busca establecer la forma cómo se evaluarán cada uno de los prerrequisitos y créditos, teniendo en cuenta la información obtenida de las simulaciones realizadas con *Autodesk Ecotect Analysis*.

2.3.2 Definición del *baseline* para la edificación

El propósito de esta etapa es establecer un mínimo de eficiencia energético propuesto para la edificación y sus sistemas, reduciendo los impactos ambientales y económicos asociados con el uso excesivo de energía.

El cálculo del *baseline* de la edificación debe hacerse conforme al método expuesto en el Apéndice G del *ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007* usando un modelo de simulación por ordenador.

2.3.3 Pre-evaluación de la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED V3.0

La evaluación de cada uno de los prerrequisitos y créditos de la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED V3.0, se llevará a cabo con base en la información obtenida en las dos etapas anteriores y los resultados de las simulaciones ejecutadas en la segunda fase, para determinar *a priori* el desempeño de la edificación.

El desarrollo de esta etapa permitirá conocer el comportamiento del modelo BIM sin calibrar, además de establecerse cuál es el procedimiento recomendado para evaluar la sección *Energy and Atmosphere*.

2.4 CALIBRACIÓN DEL BIM

El desarrollo de la fase 2, se realiza con un modelo BIM no calibrado, cuyas simulaciones muestran resultados con tendencias interesantes y comportamientos esperados, sin embargo, se debe verificar qué tan confiables son los resultados obtenidos, siendo necesario realizar la calibración del modelo.

El proceso de calibración consiste en usar un programa computacional para simulación de edificaciones (ej. *Autodesk Ecotect Analysis*) para ajustar las entradas físicas al programa, con el fin de que las variables observadas y medidas en la edificación real sean cercanas a las predichas por el programa de simulación. Una vez se logra esto, es posible hacer predicciones más confiables [6].

2.4.1 Estructuración del plan para llevar a cabo la calibración del BIM

Antes de realizar la calibración del BIM, se deben definir los criterios que se tendrán en cuenta para ello y el procedimiento a seguir, como por ejemplo [6]:

- Definir las variables que se van a considerar para ejecutar la calibración, teniendo en cuenta los medios con los que se cuenta para la toma de datos, y las variables que simula *Autodesk Ecotect Analysis*.
- Determinar el procedimiento para obtener los datos.
- Tiempo durante el que se van a tomar las medidas.
- Puntos en que se ubicarán los instrumentos de medición. Las ubicaciones tentativas serán los espacios interiores críticos seleccionadas en el desarrollo de la segunda fase.
- Si el modelo se va a calibrar respecto a mediciones mensuales u horarias. Esto dependerá de si se da prioridad a la rapidez y sencillez del proceso de calibración (mediciones mensuales) ó a la precisión del modelo calibrado (mediciones horarias).
- Con qué índice estadístico se va a comprobar el nivel de ajuste del modelo respecto a las mediciones.
- Cuáles serán las tolerancias aceptadas para los índices estadísticos seleccionados.

Los resultados de las simulaciones preliminares obtenidas en la segunda fase de la metodología servirán como referencia para decidir las variables a considerar en la calibración del BIM.

Para la selección de los puntos en los cuales se realizarán las medidas de las variables se debe tener en cuenta los puntos críticos seleccionados en la segunda fase de la metodología.

2.4.2 Medición y recolección de datos

En esta etapa se medirán las variables consideradas pertinentes para tener en cuenta al calibrar el BIM, de acuerdo al plan estructurado en la anterior etapa. Algunas de las variables que se pueden considerar son el uso de la energía, datos de demanda, niveles de iluminación y datos meteorológicos.

También se debe verificar la información de operación (ocupación, horarios, tipo de sistemas HVAC, etc.) de los espacios interiores

2.4.3 Comparación de las salidas del modelo con los datos medidos y ajustes pertinentes

En esta etapa se llevará a cabo la calibración del modelo, de acuerdo con los datos recopilados en la etapa anterior y a lo establecido en el plan.

Lo primero que se hará es ingresar al BIM la información de las condiciones de operación correspondiente al tiempo en que se efectúan las mediciones. De esta manera el modelo será una representación válida de la edificación real.

Algunas de las actividades correspondientes a esta etapa, además de las establecidas en el plan, son las siguientes:

- Ejecución de las simulaciones de *Autodesk Ecotect Analysis* a partir de las que se obtienen las variables medidas previamente.
- Comparación de los resultados de las simulaciones con las mediciones a partir del indicador estadístico medido.
- Si el indicador no se encuentra en el rango de tolerancia establecido en el plan, se deben estudiar las discrepancias y, a partir de ellas, hacer cambios en el modelo para que los resultados de las simulaciones se aproximen más a los datos reales; por ejemplo, cambiar características térmicas de los materiales.

El proceso descrito anteriormente debe hacerse hasta obtener la precisión definida en el plan de calibración.

2.5 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

En esta última fase se desarrollan las simulaciones de los espacios interiores que han sido debidamente calibradas en la fase anterior.

2.5.1 Simulación de sistemas HVAC, radiación solar e iluminación natural

Dentro de las simulaciones realizadas por la herramienta software *Autodesk Ecotect Analysis*, se seleccionarán aquellas con una potencial incidencia en el comportamiento térmico y lumínico de una edificación y por tanto, en el consumo energético de la misma. Estas serían:

- Simulación de Iluminación natural
- Simulación de radiación solar
- Simulación de sistemas HVAC

La ejecución de las simulaciones de sistemas HVAC, radiación solar e iluminación natural, permitirá la obtención de los resultados del comportamiento térmico y lumínico de una edificación, la incidencia de cada uno de los factores simulados, y el nivel de aproximación al comportamiento real.

Una vez se tiene el modelo calibrado, las simulaciones obtenidas por el programa podrán considerarse como confiables y debe continuarse con las siguientes etapas.

2.5.2 Verificación de la influencia de parámetros en la simulación

El comportamiento de una edificación está atado a muchas variables, siendo la simulación del mismo un proceso complejo, pero cada una de éstas puede incidir en mayor o menor medida.

Para determinar la influencia de cada una de ellas, es necesario modificar uno a uno a los parámetros, y observar el comportamiento del edificio a través de las simulaciones. Se tendrán en cuenta factores como la orientación, ubicación de las ventanas, materiales constructivos y otras opciones arquitectónicas, como una nueva ubicación de ventanas, variación de su tamaño o mayor uso de ellas.

Disponiendo previamente, del modelo constructivo original, se harán los cambios de uno a uno, pero no de forma acumulativa, pues es aconsejable de evaluar cada variable para realizar recomendaciones constructivas a futuras edificación.

2.5.3 Representación de resultados mediante gráficos y tablas

La información entregada por cada una de las simulaciones contiene una gran cantidad de información sobre el comportamiento de la edificación; sin embargo se hace necesario su presentación a partir de gráficos y tablas, así se facilita la comparación entre la incidencia de cada una de las variables analizadas, y se podrá extraer con mayor claridad las conclusiones acerca de la edificación y su composición arquitectónica.

2.5.4 Interpretación de resultados y recomendaciones constructivas para tener en cuenta en futuros proyectos

Una vez organizados los resultados a partir de gráficos y tablas, se ha de extraer la información sobre el comportamiento del edificio, de acuerdo a cada una de las variables analizadas. Se obtendrán conclusiones sobre las decisiones acertadas durante la construcción de la edificación y cuáles tendrían un impacto positivo en el consumo energético de haberse tomado.

A partir de dichos resultados, se podrán generar recomendaciones constructivas para futuros proyectos, de manera que tengan un menor impacto ambiental y financiero.

Referencias Bibliográficas

- [1] Graphisoft R&D Zrt. Reference Manual: Preparing ArchiCAD Models for Analysis in Ecotect. 2008. [En línea] Disponible en: http://download.graphisoft.com/ftp/download/ecotect/ArchiCAD_Model_Preparation_for_Ecotect.pdf.
- [2] Marsh, Andrew. Thermal Modelling: The ECOTECT Way. [En línea] Disponible en: <http://naturalfrequency.com/articles/thermalelements>.
- [3] Autodesk, Inc. Help Ecotect 2011. 2010.
- [4] Szokolay, Steven V. Introduction to architectural science: The basis of sustainable design. Elsevier Ltd. Segunda edición. Oxford. 2008 .
- [5] Bauer, Michael; Möhle, Peter; Schwarz, Michael. Green building - Guidebook for sustainable architecture. Editorial Springer. Berlin. 2010..
- [6] ASHRAE, Inc, ASHRAE Fundamentals - Chapter 19: Energy estimating and modeling methods, 2009.

3. CREACIÓN DEL BUILDING INFORMATION MODELLING DEL EEEEIE⁹

El modelo de información de construcción de una edificación, BIM (*Building Information Modelling*), es el resultado del modelado en tres dimensiones de una edificación con un software gráfico, incorporando información sobre su diseño, construcción y operación [1].

La información incluye la geometría del edificio, relaciones espaciales, información geográfica, y las propiedades de los elementos constructivos (muros, pisos y techos); como por ejemplo, sus materiales [2]. Estas características se definen previamente a la realización de las simulaciones en *Autodesk Ecotect Analysis*; ya que a partir de éstas, se extrae la información requerida en los análisis.

En este capítulo se describe el proceso de ingreso de información sobre el Edificio de la Escuela Estudios Industriales y Empresariales (EEEIE) a *Autodesk Ecotect Analysis*, a fin de crear el modelo 3D, con base en el cual, se podrán realizar simulaciones energéticas, cuyos resultados mostrarán un comportamiento energético aproximado a la operación real de la edificación. También se modelan los objetos aledaños a la edificación, como árboles y otros edificios, que pueden obstruir la iluminación o ventilación natural.

Es importante resaltar que el modelo de la edificación obtenido en este capítulo no implica un desarrollo de ecuaciones matemáticas y ha sido desarrollado con

⁹ Sigla usada para referirse al Edificio de la Escuela Estudios Industriales y Empresariales (EEEIE).

base en la propuesta metodológica establecida para los análisis energéticos a edificaciones, expuestos en el capítulo anterior.

A partir de este modelo, *Autodesk Ecotect Analysis* extrae valores y relaciones entre propiedades físicas del EEEIE, como áreas, volúmenes de aire, flujos de calor, niveles de iluminación, etc.

El proceso para crear este modelo se hace con base en la representación de su geometría 3D con un software hecho para este fin, definiendo las propiedades térmicas y lumínicas de los elementos que constituyen la edificación, el horario de operación y ubicación geográfica con el asistente de *Autodesk Ecotect Analysis*.

En la Figura 3.1 se especifica la información considerada para la creación del BIM del EEEIE; en particular, parámetros que inciden en las simulaciones térmicas y lumínicas objeto de este trabajo de grado; asimismo, se ilustra la estructura del capítulo.

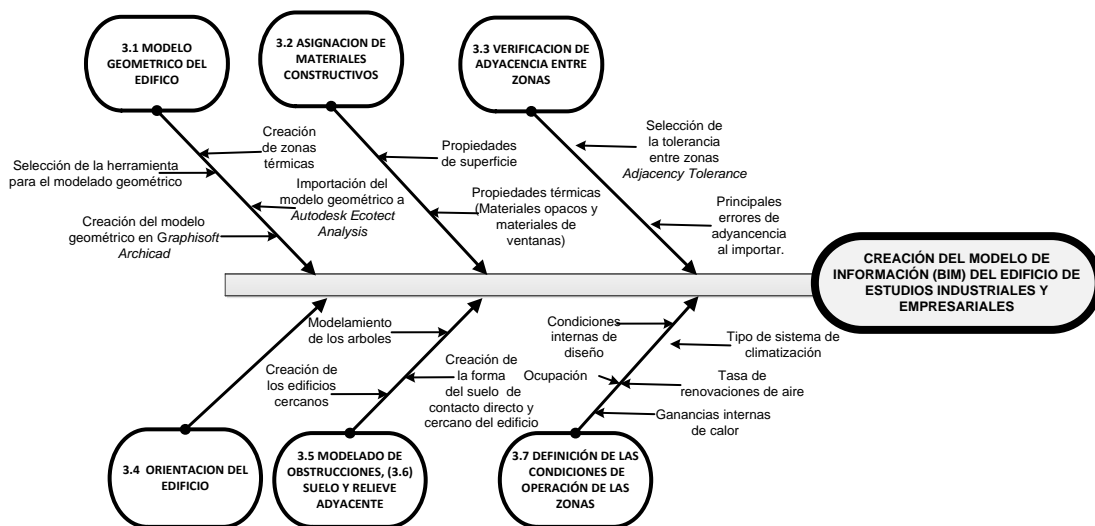


Figura 3.1 Descripción gráfica de la estructura del capítulo 3.

3.1. Modelo geométrico del edificio

Un modelo geométrico creado en *Autodesk Ecotect Analysis* se diferencia del establecido en programas tradicionales CAD (e.g.¹⁰ *AutoCAD*), en que el primero

¹⁰ *Exempli gratia* (por ejemplo)

requiere la definición de las características de cada elemento y su interrelación con otros; mientras, el segundo sólo se concentra en la creación de elementos a partir de líneas de manera que se obtenga un modelo visualmente correcto [3]. Para construir un modelo según el primer enfoque se deben diferenciar, desde la creación, los elementos básicos que constituyen una edificación como muros, ventanas, puertas, pisos y techos.

El EEEIE se considera una edificación compleja, pues cuenta con seis (6) pisos, incluyendo el sótano, en los que se encuentran treinta y siete (37) aulas, dos auditorios, un centro de estudios, una sala de cómputo, una cafetería, oficinas de profesores, oficinas administrativas, baños y cuartos de almacenamiento. Por esta razón, el modelo geométrico no se construyó directamente en *Autodesk Ecotect Analysis*, sino usando *Graphisoft ArchiCAD* y, posteriormente, fue importado.

El modelo importado se corrigió directamente en el programa, debido al incorrecto reconocimiento de ventanas y puertas, objetos no importados y zonas¹¹ que no están completamente cerradas [4]. Adicionalmente, se añadieron las escaleras y elementos de sombras creados a partir de *Google SketchUp*.

A continuación se presenta el desarrollo de las etapas desarrolladas para la creación del modelo geométrico del EEEIE.

3.1.1. Selección de la herramienta para la creación del modelo geométrico

La selección de la herramienta para importar el modelo 3D depende del formato requerido. Se pueden considerar dos formatos de importación, zonas térmicas (**.gbXML**) o zonas geométricas (**.3ds**), los cuales son descritos en el ANEXO F.

Con base en las consideraciones expuestas en el ANEXO F, se decidió realizar el modelado del EEEIE a partir del formato zonas térmicas (**.gbXML**), ya que permite llevar a cabo tanto análisis térmicos como lumínicos en un mismo modelo;

¹¹ Representación simplificada de cada área del edificio, definida como un volumen cerrado de aire homogéneo que contiene la información sobre su volumen, materiales y adyacencia con las demás zonas definidas [9].

y además, facilita la definición de características de la edificación, como materiales, volumen y adyacencia.

Las herramientas computacionales asociadas a estos archivos cuentan con motores para la creación de BIM (*Building Information Model*) [5], siendo las más importantes para ello, *Autodesk Revit Architecture* y *Graphisoft ArchiCAD* [6].

Estas herramientas permiten generar modelos para la representación de la geometría 3D, e información sobre materiales, características y elementos constitutivos de la edificación. La información puede incluir área y volumen de espacios, propiedades térmicas, descripciones de las habitaciones, ventanas, puertas y acabados [7].

Previo a la creación del BIM del EEEIE, se exploraron de las dos herramientas mencionadas previamente. Teniendo en cuenta la complejidad del proceso para obtener el modelo 3D de una edificación, partiendo de sus planos arquitectónicos, se decidió usar *Graphisoft ArchiCAD*. Los planos arquitectónicos del EEEIE fueron facilitados por la división de planta física de la Universidad Industrial de Santander en formato **.DWG**.

Debido a que al importar el plano **.DWG**, con el fin de tomarlo como guía para el trazado del modelo 3D, no se pueden considerar las líneas como base para la construcción de los muros, no se usó *Autodesk Revit*, y por ello, se seleccionó el software *ArchiCAD* por su utilidad en la importación de la geometría 2D.

3.1.2. Creación del modelo geométrico en Graphisoft ArchiCAD

La creación de un modelo geométrico en *Graphisoft ArchiCAD* se basa en elementos constructivos (muros, ventanas, puertas, techos, forjados) predefinidos en el programa a los que pueden modificarse sus propiedades. Por ejemplo, para dibujar los muros se selecciona la herramienta de muros y se trazan en la ubicación deseada; además, se puede modificar su altura, grosor y materiales de acuerdo a las especificaciones del diseño.

Otra particularidad del modelado en *Graphisoft ArchiCAD*, es que a pesar de trabajar en 2D, el programa interpreta esta información y crea simultáneamente el modelo 3D.

Para el modelado geométrico del EEEIE, se importaron los planos arquitectónicos en formato **.DWG** a *ArchiCAD*, y se usaron como guía para el trazado con las herramientas del programa.

A continuación se presentan las consideraciones que se tuvieron en cuenta al crear el BIM del EEEIE en *Graphisoft ArchiCAD*, con el fin de lograr el reconocimiento de la mayor parte de la información, al importarlo a *Autodesk Ecotect Analysis* [8].

1. El modelo del edificio debe hacerse sólo usando elementos básicos (muros, forjados, techos, ventanas, puertas y aberturas).
2. El edificio debe ser modelado considerando que será usado en *Autodesk Ecotect Analysis* y no pensando en que se vea estéticamente correcto en *ArchiCAD*; por lo cual, puede ser necesario simplificar algunos aspectos de la geometría. Por ejemplo, en el caso de puertas y ventanas que tienen formas especiales con fines estéticos, se deben modelar con un tipo más sencillo que cumpla con las características de tamaño, ubicación y materiales que incidirán directamente en los análisis térmicos y lumínicos.
3. Cada cuarto debe crearse siempre como una zona, y los elementos no deben cruzarse entre zonas.
4. Los muros deben ser dibujados en *ArchiCAD* teniendo en cuenta únicamente su altura, ya que las demás características no son reconocidas al importar el modelo a *Autodesk Ecotect Analysis*.
5. Los materiales de todos los elementos se deben definir directamente en *Autodesk Ecotect Analysis*, pues no se reconocen correctamente en la importación.
6. Se ha de simplificar los muros curvos logrando su forma aproximada con segmentos rectos

Al crear el modelo geométrico de la edificación, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se tuvo que realizar las modificaciones y simplificaciones presentadas en el ANEXO G, para facilitar la interpretación al importarlo a *Autodesk Ecotect Analysis*, manteniendo la fidelidad con la estructura real del edificio.

En la Figura 3.2 se muestra el modelo geométrico del EEEIE creado en *Graphisoft ArchiCAD 15 EDU*¹², con licencia para estudiantes obtenida en la página de *Graphisoft*.

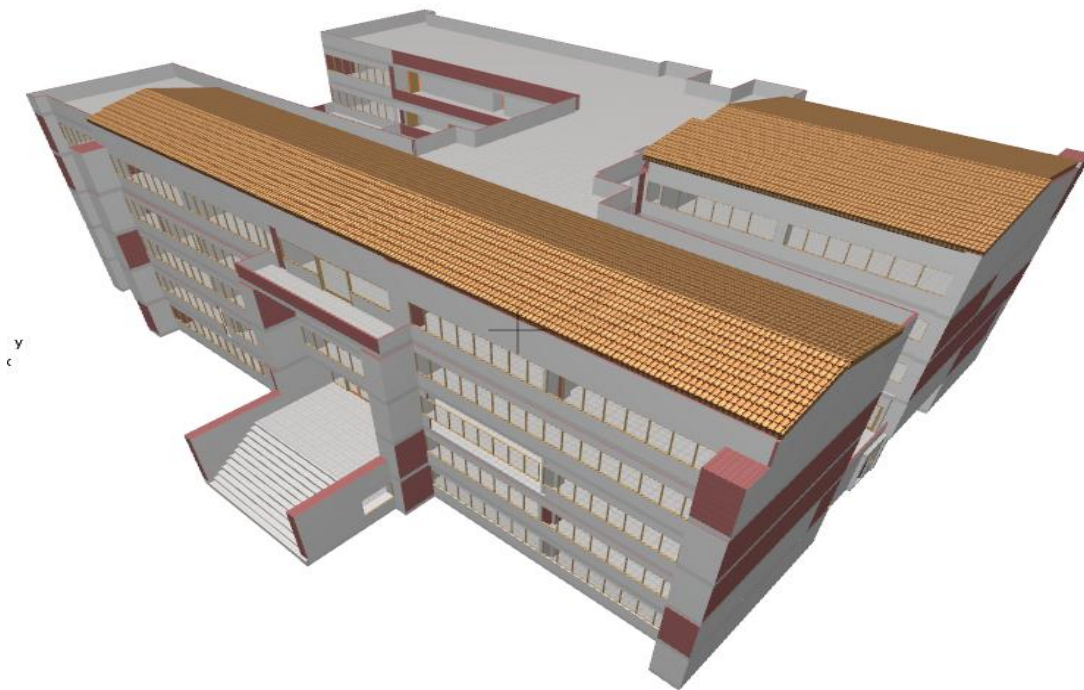


Figura 3.2. Modelo geométrico del Edificio de Estudios Industriales y Empresariales – *Graphisoft ArchiCAD 15 EDU*.

3.1.3. Definición de las zonas térmicas en *Graphisoft ArchiCAD*

Una zona térmica es 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.

¹² Las licencias estudiantiles de ArchiCAD-64, versión 15.0.0 que se usaron fueron: S4WE3X6YAGXLFJ0VR5Z9 (Vence: 30/10/2012), SKGRV4M607MDI36E6BXO (Vence: 26/10/2012)

Graphisoft ArchiCAD permite crear las zonas de forma manual, o automática una vez instalado el complemento *gbXML Export for ArchiCAD*. Para crear las zonas manualmente, se debe trazar el contorno de cada zona que constituye el edificio con las herramientas de *ArchiCAD*; mientras que, si se ejecuta el asistente para la creación automática de zonas, se detecta cada espacio que conforma el edificio y se asigna una zona.

Se decidió trazar las zonas del EEEIE de manera automática, ya que se agiliza su proceso de definición. Además, se generan a partir de las superficies internas de las aulas; por lo que, el modelo permite hacer análisis térmicos, de iluminación y sombras [9]. En este proceso se presentaron problemas con la detección de algunas aulas; por lo que, fue necesario realizar correcciones en la información.

Para considerar la existencia de cielo raso en las aulas, se definieron dos zonas por aula, una que representara el volumen de aire entre el piso y el cielo raso, y otra el espacio de aire entre el cielo raso y la placa del siguiente piso.

En la Figura 3.3 se muestra una captura de zonas trazadas con *Graphisoft ArchiCAD*. Se aprecia como el programa crea las zonas basándose en el contorno interno del aula.

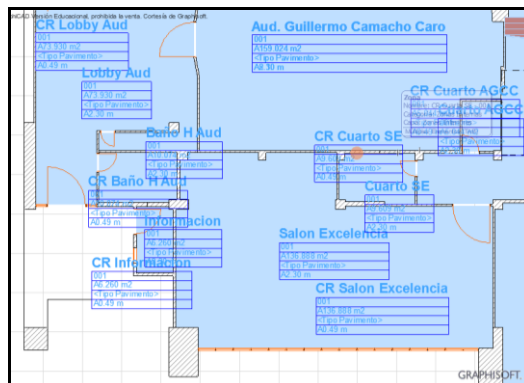


Figura 3.3. Zonas del Edificio de Estudios Industriales y Empresariales trazadas con Graphisoft ArchiCAD.

Después de realizar la corrección y verificación de las zonas térmicas, se guardó el modelo como archivo **.gbXML** para que pueda ser importado a *Autodesk Ecotect Analysis*.

3.1.4. Importación del modelo geométrico a *Autodesk Ecotect Analysis*

En la sección 3.1.2 se presentaron consideraciones a tener en cuenta para la creación del modelo en *Graphisoft ArchiCAD*, y el reconocimiento de la mayor parte de la información; para evitar la definición de aspectos que no son tenidos en cuenta al importarlo a *Autodesk Ecotect Analysis*. Sin embargo, se debieron corregir algunos aspectos, que en resumen son presentados en el ANEXO H.

La mayoría de los errores de importación se deben a las puertas y ventanas fuera del muro al que pertenecen, como se puede ver en la Figura 3.4. Para corregirlo se debieron seleccionar los objetos pertenecientes a un muro e indicar su relación a partir del comando *Link*.

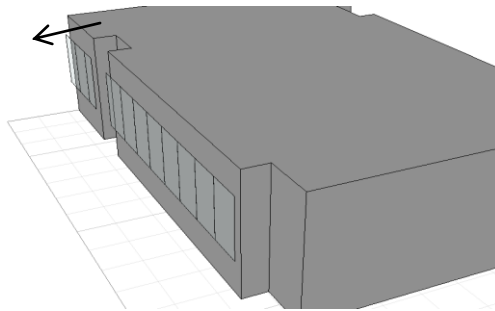


Figura 3.4. Ventanas fuera de los muros en el modelo del EEEIE.

Como se indica en el ANEXO H, las escaleras y cortasoles se crearon en *Google SketchUp*, pues no se reconocieron correctamente y resulta difícil su construcción en *Autodesk Ecotect Analysis*. En la Figura 3.5 se muestra el modelo creado para representar las escaleras de emergencias.

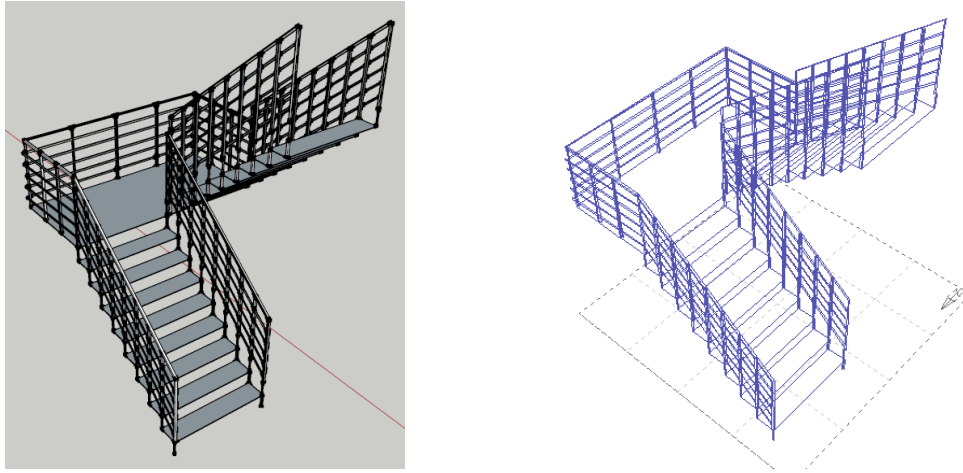


Figura 3.5. Modelo de las escaleras de emergencia creado en *Google SketchUp*.

En el software *Autodesk Ecotect Analysis* se puede apreciar un modelo geométrico en dos estilos, *3D Editor* y *Visualise*. El primero permite crear y modificar zonas, asignar materiales y ubicar objetos importados; mientras, el segundo tiene como función la visualización espacial de la edificación. En la Figura 3.6 se visualiza el modelo del EEEIE en *3D Editor* y en la Figura 3.7 en *Visualise*.

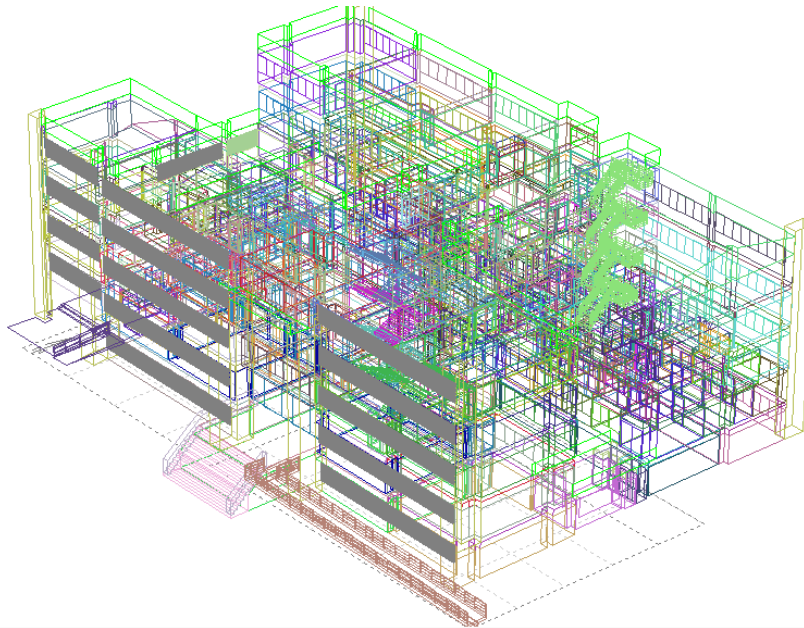


Figura 3.6. Modelo geométrico del EEEIE en *Autodesk Ecotect Analysis – Editor 3D*.

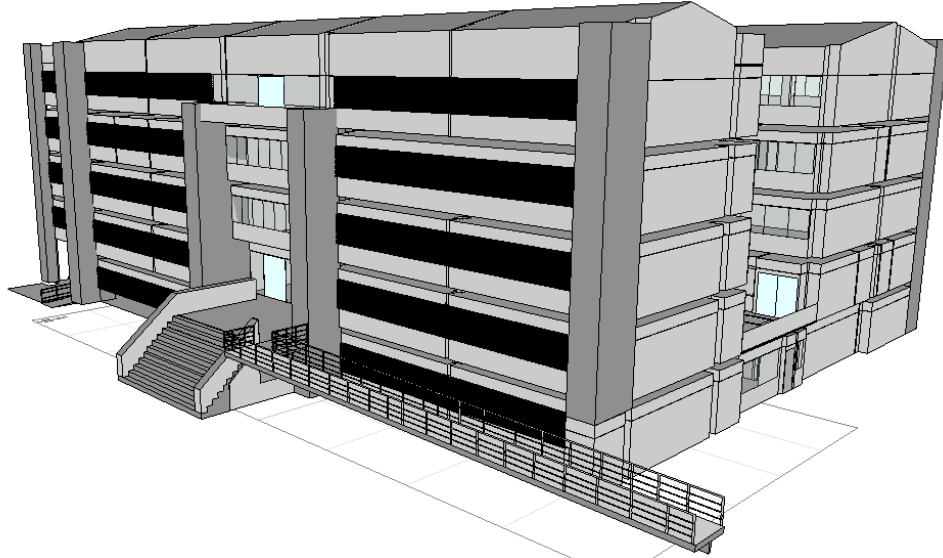


Figura 3.7. Modelo geométrico del EEEIE en Autodesk Ecotect Analysis – Visualise.

3.2. Asignación de los materiales constructivos

Los materiales se definen según sus propiedades de absorción del sonido, térmicas, superficie y costos. En la Tabla 3.1 se presentan las propiedades que definen los materiales en *Autodesk Ecotect Analysis* [10].

Propiedades térmicas (Materiales opacos)	Propiedades térmicas (Materiales de ventanas)	Propiedades de superficie	Absorción del sonido	Costos
<ul style="list-style-type: none"> - Valor-U ó coeficiente global de transferencia de calor [W/m² K] - Admitancia específica [W/m² K] <ul style="list-style-type: none"> - Retraso térmico [horas] - Decremento térmico [0-1] - Absorción solar [0-1] 	<ul style="list-style-type: none"> - Valor-U o coeficiente global de transferencia de calor [W/m² K] - Admitancia específica [W/m² K] - Coeficiente de ganancias solares de calor [0-1] - Ganancias solares alternas [0-1] <ul style="list-style-type: none"> - Índice de refracción - Transmitancia visible [0-1] 	<ul style="list-style-type: none"> - Emisividad - Especularidad - Rugosidad <ul style="list-style-type: none"> - Color (Reflectividad) 	<ul style="list-style-type: none"> - Coeficientes de absorción de sonido - Índice de ruido 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo por unidad de área

Tabla 3.1. Propiedades que definen los materiales en *Autodesk Ecotect Analysis*.

En *Autodesk Ecotect Analysis* se pueden definir los materiales que constituyen cada elemento constructivo, de acuerdo a la disponibilidad en las librerías del programa, o creando nuevos materiales al modificar sus propiedades térmicas y visuales, a partir del asistente del programa como se observa en la Figura 3.8.

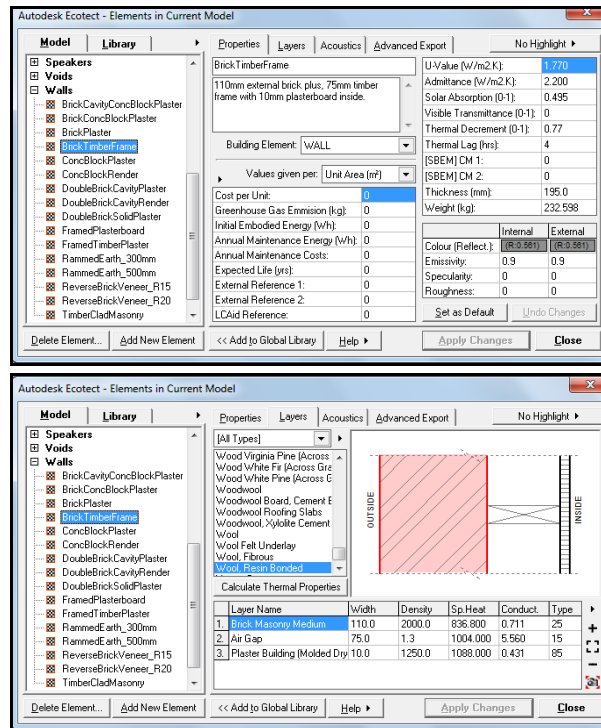


Figura 3.8. Capturas del asistente de Autodesk Ecotect Analysis para asignar materiales.

Al importar el modelo del EEEIE creado en *Graphisoft ArchiCAD*, se observa que ninguno de los materiales asignados automáticamente durante la importación cumplía con las características requeridas; ya que, *Autodesk Ecotect Analysis* no reconoce en detalle los materiales importados desde otro programa, sino que asigna un material por defecto a cada tipo de elemento. Por ejemplo, a los muros se les asigna el material *Brick Timber Frame* por defecto, que es un ladrillo de 11 cm de grosor con un espacio de aire de 7,5 cm y 1 cm de yeso de construcción.

La información de los materiales del EEEIE se obtuvo de las especificaciones técnicas publicadas en el link *Contratación* de la UIS¹³. Algunos de sus materiales no coinciden con los predefinidos en *Autodesk Ecotect Análisis*; por esta razón, fue necesario modificar algunas características técnicas o crear nuevos materiales. En el ANEXO I se presentan los materiales asignados a cada elemento del edificio, sus características y las razones de su elección.

Cabe resaltar que en *Autodesk Ecotect Analysis* se deben asignar dos materiales a cada elemento constructivo, denominados material primario y material

¹³ Disponible en línea en: https://www.uis.edu.co/procesos_contratacion/contrataciones/licitaciones/licitaciones_2009/licitaciones_2009.html

alternos. El material primario es el que compone al elemento; mientras, que el material alternativo tiene una función que depende del tipo de elemento. Para paredes, techos, y pisos se usa cuando el objeto se superpone con otro objeto que pertenece a la superficie exterior de otra zona. En el caso de ventanas, puertas, paneles, huecos, aparatos y fuentes, el material alternativo se usa cuando el objeto se activa durante los cálculos basados en el tiempo; con la activación se puede simular la apertura de puertas y ventanas o el encendido de aires acondicionados.

La mayoría de los errores que se presentan durante los cálculos de adyacencias se deben a la definición incorrecta de los materiales alternos de los elementos.

3.3. Verificación de adyacencia entre zonas térmicas

Dos zonas térmicas se consideran adyacentes si están una al lado de la otra y comparten elementos. Al definir dos zonas como adyacentes, *Autodesk Ecotect Analysis* establece que entre ellas puede ocurrir un flujo térmico. Para realizar simulaciones, se debe calcular previamente la adyacencia entre zonas, usando la opción *Interzonal Adjacency Calculation*, que se encuentra en el menú *Calculate* [9].

La manera que *Autodesk Ecotect Analysis* reconoce que las dos aulas son adyacentes es definir la tolerancia de adyacencia (*Adjacency Tolerance*) mayor o igual que **a** (Ver Figura 3.9.) Como el complemento para la detección automática de zonas de *Graphisoft ArchiCAD* traza las zonas a partir del contorno interno del aula, la separación **a** es equivalente al grosor del muro.

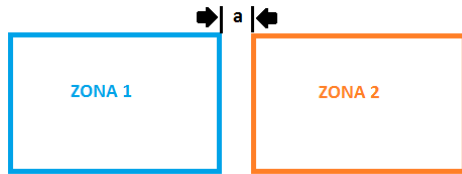


Figura 3.9. Separación entre zonas al definir las usando el contorno interno del aula - Vista lateral.

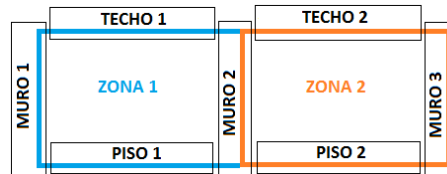


Figura 3.10. Forma en que Autodesk Ecotect Analysis interpreta el elemento adyacente (Muro 2).

En la Figura 3.10 se representa lo que interpretaría el programa cuando un elemento (muro 2) compartido por las zonas 1 y 2 se considera adyacente, pues la distancia a que separa las dos zonas es igual o menor a la tolerancia de adyacencia definida. Las caras de ambas zonas que se encuentran adyacentes se consideran el mismo elemento.

Si las zonas del modelo no se encuentran bien definidas, ocurren errores que no permiten que se ejecute el proceso. A continuación se presentan las consideraciones que se tuvieron presentes para evitar y/o solucionar problemas relacionados con la adyacencia entre zonas.

1. Cuando hayan dos elementos adyacentes con un material diferente cada uno, el material primario (*Pri Material*) corresponde al real, y el material alterno (*Alt Material*) debe ser el material del elemento adyacente.
2. Para que Autodesk Ecotect Analysis considere dos zonas cercanas adyacentes, deben estar a una distancia menor o igual a la tolerancia de adyacencia definida y ser paralelas.
3. Si una zona está en contacto directo con el exterior se debe crear un elemento de vacío (*Void*).
4. Si no se puede detectar el error, se recomienda volver a dibujar la zona, utilizando la zona defectuosa como guía para el trazado y de esta manera evitar traslapes con otras zonas.

Durante la creación del modelo geométrico del EEEIE, se realizó el cálculo de adyacencia entre zonas en dos ocasiones; en la primera se terminó de corregir el modelo geométrico (correcciones de ubicación de puertas y ventanas), para detectar zonas abiertas (alguna de las superficies que las componen no coincide

con las caras adyacentes permitiendo el paso de aire) o zonas sin volumen, que indican la existencia de un error durante su trazado y es necesario hacerlas de nuevo; mientras, el segundo cálculo de adyacencia, se realizó para corregir errores en la asignación de los materiales.

3.4. Orientación del edificio

La orientación de la edificación influye principalmente en la incidencia de la radiación solar y los vientos a cada una de sus fachadas.

Para especificar la orientación en *Autodesk Ecotect Analysis* se debe ir a la pestaña *Project*, y en *Site specifics* ajustar la orientación del punto Norte en relación a la perpendicular de la fachada principal, de igual manera se debe especificar la altura de la edificación sobre el nivel del mar. En la Figura 3.11 se muestra el cuadro de diálogo donde manualmente se ajustan los datos al software, en este caso se tienen los datos asociados al EEEIE.

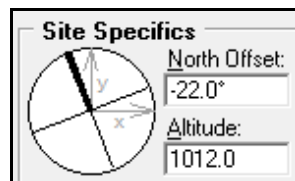


Figura 3.11. Definición de la orientación de la edificación en Autodesk Ecotect Analysis.

3.5. Modelado de obstrucciones

Las sombras causadas por las obstrucciones reducen la cantidad de radiación solar que llega a las paredes del edificio y, a su vez, afecta la luz natural disponible y las ganancias térmicas de cada zona [11].

Al realizar simulaciones con herramientas computacionales como *Autodesk Ecotect Analysis*, se deben incluir modelos de los objetos adyacentes al edificio que pueden obstruir los vientos y la radiación solar que incide en sus paredes [11]. En el caso del EEEIE, se consideró el efecto de los edificios más cercanos, creando volúmenes equivalentes en ubicación, orientación y forma, como:

- La Casona la Perla
- Instituto de Lenguas UIS
- Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones – Fue modelada de acuerdo a la información contenida en los planos de las renovaciones hechas.
- Edificio Federico Mamitza Bayer – Diseño Industrial

Aunque en los alrededores al EEEIE hay gran cantidad de árboles, sólo se consideraron los más altos y frondosos, que por su cercanía podrían modificar la radiación solar y los vientos incidentes en la fachada. Para modelarlos se usaron dos planos perpendiculares como aproximación de la obstrucción, pues un modelo con mayor detalle implicaría un alto costo computacional (tiempo), que haría más lentas las simulaciones de *Autodesk Ecotect Analysis*.

Se emplearon varios modelos de árboles, de acuerdo a la cantidad de luz que permiten pasar y al espacio que ocupan sus hojas. Su altura se adaptó de acuerdo a la de los árboles reales en el caso de los más cercanos al EEEIE; en el caso de los árboles alejados del edificio, como los cercanos a la Perla y al Instituto de Idiomas, se modelaron con menor exactitud, pero se procuró crear obstrucciones equivalentes a las reales, al igual que los árboles en la zona norte del edificio. Además, se les asignó el material propuesto en las librerías de materiales de *Autodesk Ecotect Analysis* para representar el color y las propiedades de las hojas.

En la Figura 3.12 se muestran las obstrucciones consideradas en el modelado de la edificación en el entorno de *Google SketchUp*.



Figura 3.12. Obstrucciones adyacentes al EEEIE vistas desde el Noroeste – *SketchUp*.

Es importante resaltar que para realizar un modelado con significativa exactitud de todas las obstrucciones adyacentes a la edificación, se tendrían que realizar una caracterización exhaustiva, lo cual no es el objeto de este trabajo de grado. Sin embargo, se procuró considerar los obstáculos de mayor tamaño y cercanía porque su efecto en la radiación solar y vientos que inciden en el edificio es mayor.

3.6. Modelado del suelo y relieve adyacente

El efecto del suelo y el relieve adyacente sobre un edificio puede llegar a modificar su microclima característico; y por tanto, variar los resultados de simulaciones térmicas y lumínicas.

Para considerar el relieve en el que se encuentra ubicado el EEEIE, se tuvo en cuenta la altura de los objetos adyacentes como árboles y edificios cercanos, respecto a la edificación.

Se consideró la influencia del suelo en el edificio, a partir de dos aspectos; el primero, la forma del suelo cercano que puede causar obstrucciones en la luz natural, y que llega a algunos salones del primer piso al estar ubicados por debajo del nivel del suelo; y el segundo, el suelo que queda en contacto directo con las

fachadas del edificio y su base pudiendo afectarlo térmicamente, de acuerdo a la temperatura de la tierra.

Esta temperatura es calculada automáticamente por *Autodesk Ecotect Analysis* basándose en la temperatura promedio anual y la tendencia de los sesenta (60) días anteriores a la fecha en que se realicen los análisis. Para ello, se divide el suelo en diez (10) franjas que se usan para interpolar entre las temperaturas por hora a nivel del suelo y la temperatura promedio anual por debajo de dos (2) metros [9].

Al realizar el cálculo de adyacencia entre zonas, *Autodesk Ecotect Analysis* guarda el porcentaje del área de cada superficie enterrada en cada franja, para usarlo en los cálculos horarios del flujo de calor. Para los elementos horizontales adyacentes a la tierra como las placas de pisos, se usa el método propuesto en la Norma ISO 13792:2005 [9].

Al crear el modelo de un edificio en *Autodesk Ecotect Analysis*, existen dos (2) formas de definir que una superficie del edificio está en contacto con la tierra, se puede ubicar esta superficie en el nivel de referencia ($z = 0$) o crear planos adyacentes a la superficie pertenecientes a la *zona exterior (Outside)*.

Cuando se trata de un nivel que se encuentra completamente enterrado o en contacto con la tierra, simplemente se desplaza el edificio verticalmente de manera que la parte enterrada quede por debajo del nivel de referencia ($z = 0$), y que la superficie en contacto con la tierra sea adyacente a este nivel.

En caso de que se requiera indicar que sólo parte de un muro está en contacto directo con la tierra, se deben dibujar planos pertenecientes a la *zona exterior (Outside Zone)*, predefinida en *Autodesk Ecotect Analysis*, que representen la región, ya que en el programa se asume que cualquier superficie en una zona térmica inmediatamente adyacente a una superficie de la zona exterior está bajo tierra.

La Figura 3.13 realizada por el Doctor Andrew J. Marsh (autor de *Autodesk Ecotect Analysis*), permite un mayor entendimiento del uso de superficies de la *zona exterior* para indicar que alguna pared del edificio es adyacente a la tierra. En

esta se ve un cuarto perteneciente a una zona adyacente a la *zona exterior* (planos marrones), con la cual se modela un montículo de tierra que está en contacto con la habitación.

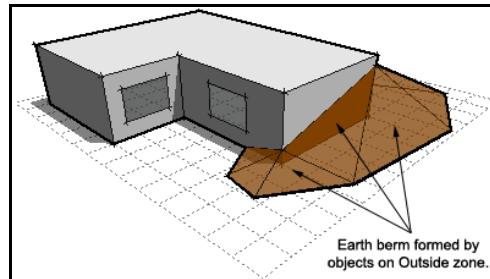


Figura 3.13 Montículo de tierra adyacente a una zona térmica de un edificio, modelado mediante planos pertenecientes a la Zona Exterior [9].

En el modelado del suelo del EEEIE, se tuvo en cuenta el procedimiento descrito anteriormente para considerar el efecto de obstrucción en la iluminación natural del primer piso, y el efecto térmico producido por la temperatura de la tierra cuando está en contacto con las paredes de la edificación.

3.7. Definición de condiciones de operación de las zonas

El modelo BIM, hasta el momento cuenta con la creación de la geometría 3D del edificio, la definición de adyacencias y la asignación de los materiales con sus respectivas propiedades térmicas y lumínicas; por tanto se procede a fijar las condiciones de operación en las zonas; esto se desarrollara en este numeral.

Los parámetros que definen las condiciones de operación de una zona térmica, se especifican por medio del asistente para administración de zonas del *Autodesk Ecotect Analysis*. En la Figura 3.14 se presenta una captura del asistente de administración de zonas.

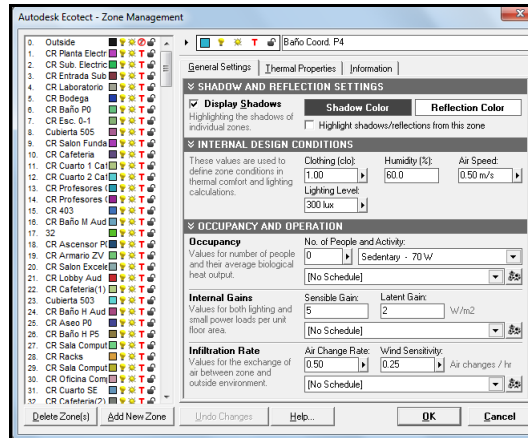


Figura 3.14. Asistente para administrar zonas.

A continuación se definen los valores de los parámetros relacionados con las condiciones de operación tenidos en cuenta al crear el BIM del EEEIE. Cabe destacar que en la metodología (Capítulo 2) se presenta la definición de las condiciones de operación.

3.7.1. Condiciones internas de diseño

Los parámetros a tener en cuenta en los cálculos de confort térmico que determinan las condiciones internas de diseño son ropa, humedad y velocidad del aire; para los cálculos lumínicos se considera el nivel de iluminación.

Al asignar el valor de diseño que representa las ganancias térmicas que aportan la ropa que usan los ocupantes, se consideró la escala dada por *Autodesk Ecotect Analysis*, que se presenta en la Tabla 3.2. Como el clima de Bucaramanga es cálido, y la gente, generalmente, usa pantalón y camisa para ir a la universidad, se asignó un valor de *Ropa* de 0.6.

DESCRIPCIÓN DE ROPA	FACTOR [CLO]
Desnudo	0
Sólo ropa interior	0,2
Pantalón corto y camiseta	0,4
Pantalón y camisa	0,6
Traje de calle	1
Traje de calle + Ropa interior térmica	1,5
Chaqueta y abrigo	2
Ropa pesada de invierno	2,5
Ropa tipo Ártico	3

Tabla 3.2. Valores que describen las ganancias térmicas aportadas por el tipo de ropa [10].

La humedad de diseño se definió al establecer que los seres humanos, generalmente, son poco sensibles a los cambios de humedad relativa, cuando se encuentra entre el 30% y el 70%. Si se percibe, se manifiesta como cambio de temperatura, aunque ésta permanezca constante. La temperatura percibida es menor para humedades bajas, porque más fácilmente se evapora el sudor de la piel [12].

Como la humedad relativa de Bucaramanga se encuentra entre el 80% y 90%, las personas están acostumbradas a tolerar niveles relativamente altos de humedad; por lo cual, se maneja una humedad de diseño del 70%.

La velocidad del aire se determinó con base en la Tabla 3.3, que es la sugerida por *Autodesk Ecotect Analysis*. Se asignó una velocidad de 0,5 m/s para todas las zonas, que corresponde a una brisa placentera.

DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD [m/s]
Calma	0
No perceptible	0,1
Apenas perceptible	0,3
Brisa placentera	0,5
Brisa suave	0,7
Movimiento de cabello y papeles	1,0
Corrientes de aire perceptible	1,4
Brisa molesta	1,7
Ventoso	2,0

Tabla 3.3. Clasificación del viento de acuerdo a su velocidad.

Para decidir el nivel de iluminancia (lux) de diseño para cada aula, se consideró el tipo de actividad que se realiza en su interior, y se asignó el valor medio recomendado por el RETILAP. En la Tabla 3.4 se resumen los valores tenidos en cuenta para la asignación del nivel de iluminancia.

Tipo de recinto y actividad	Nivel de iluminancia [lx]
Áreas de circulación, corredores	100
Escaleras, escaleras mecánicas	150
Vestidores, baños	150
Almacenes, bodegas	150
Oficinas de tipo general, mecanografía y computación	500
Salones de clase – Iluminación general y tableros	500
Salas de conferencia – Iluminación general	500

Tabla 3.4. Nivel de iluminancia de diseño dependiendo del tipo de recinto y actividad [13].

3.7.2.Ocupación

Los parámetros de ocupación se usan para cuantificar las ganancias de calor que aportan las personas dentro de la zona, dependiendo de la actividad que realicen [10]. Para asignar la potencia disipada por cada persona en las zonas del EEEIE, se usó la Tabla 3.5 recomendada por *Autodesk Ecotect Analysis*, por lo que, en las aulas de clase y en las oficinas se asignó un valor de 70 W, y en los pasillos 80 W.

Actividad	Potencia [W]	Actividad	Potencia [W]	Actividad	Potencia [W]
Sedentaria	70	Digital	65	Bailar, despacio	140
Caminar	80	Oficinista	70	Bailar, rápido	255
Ejercitarse	100	Cocinar, ligero	95	Deporte en equipo	440
Agotadora	150	Cocinar, pesado	115	Ejercicio, ligero	175
Dormir	40	Limpieza, ligero	115	Ejercicio, pesado	235
Descansar	45	Limpiar, pesado	220	Trabajo pesado	235
Leer	55				

Tabla 3.5. Calor liberado por un ser humano durante la realización de algunas actividades [10].

El horario de ocupación es el correspondiente al segundo semestre del 2011, el cual fue suministrado por la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.

3.7.3.Ganancias internas

Como no se requiere la exportación del modelo del EEEIE de *Autodesk Ecotect Analysis* a otro programa, sólo se definió la ganancia sensible, aspecto considerado por el software para los cálculos. Esta ganancia se obtiene a partir de suma de las ganancias de calor producidas por la iluminación y por otros equipos dentro de la zona, expresada en W/m^2 .

Para calcular la ganancia de calor que aportan las lámparas se debe considerar si son de tipo incandescente o fluorescente. En el caso de que sean incandescentes se les asigna un aporte de calor equivalente a su potencia, pero cuando se tienen lámparas fluorescentes se incrementa su aporte en un 10% para tener en cuenta el balasto [14] , [15].

En el caso del EEEIE, se tomaron los planos de iluminación, y a partir de las especificaciones de cada aula, se obtuvo la potencia instalada en cuanto a lámparas y se aplicó un factor de 1,1 para considerar los balastos.

Se considera que la potencia de las cargas eléctricas diferentes a la iluminación se transforma completamente en calor sensible [14]. A cada zona se asignó la potencia de acuerdo a los equipos con los que está dotada, según lo establecido en la programación del segundo semestre del 2011.

En la Tabla 3.6 se muestran las potencias de los equipos consideradas para calcular su contribución a las ganancias sensibles de las zonas.

Equipo	Potencia [W]
Computador de escritorio	200-400
Computador portátil	100-200
Video Beam	260
Sonido	100-200

Tabla 3.6. Potencia de los equipos considerados para el cálculo a las ganancias sensibles.

3.7.4. Tasa de intercambio de aire

En la Tabla 3.7 se presenta la tasa de renovaciones de aire de una zona de acuerdo a la hermeticidad de la fachada del edificio, manejada por *Autodesk Ecotect Analysis*.

Construcción	Tasa de renovaciones de aire [renovaciones de aire/hora]
Hermética	0,25
Bien sellada	0,5
Promedio	1
Agujereada	2

Tabla 3.7. Tasa de renovaciones de aire de acuerdo a las características de la fachada del edificio.

De acuerdo a la tabla anterior, y a las características constructivas del EEEIE, se asignó una tasa de renovaciones de aire de 0,5 por hora cuando los salones funcionan con aire acondicionado, suponiendo que las ventanas se encuentran cerradas.

Al simular una zona con ventilación natural, se debe considerar que *Autodesk Ecotect Analysis* puede determinar cuando abrir o cerrar ventanas, dependiendo de las condiciones ambientales internas y externas, con el fin de ajustar sombreado y efectos de transmisión o refractivos de la luz, pero no puede simular

el flujo de aire. Esto ocurre porque el software no realiza cálculos detallados de dinámica de fluidos, y para considerar los efectos del flujo de aire entre el interior y exterior de la edificación, se deben definir manualmente el valor de la tasa de infiltración de aire y la sensibilidad al viento en las condiciones de operación de las zonas.

Al analizar la respuesta de las aulas del EEEIE a la ventilación natural, se decidió asignar una tasa de renovaciones de aire igual a 5 [renovaciones de aire / hora]. El valor se estimó teniendo en cuenta que Andrew Marsh, creador de *Autodesk Ecotect Analysis*, recomienda usar para zonas con ventilación cruzada¹⁴ 5 renovaciones/hora [10].

Como las aulas tendrán un flujo de aire modesto en comparación a una ventilación cruzada, aún con todas las ventanas abiertas, se debe asignar un valor menor de renovaciones de aire. Para definir el valor de 5 renovaciones/hora también se consideró la temperatura interna simulada preliminarmente para el aula, y se ajustó para obtener una temperatura que se considera se podría presentar en el EEEIE. Esta estimación se corregirá y ajustará en la fase de calibración del BIM, de acuerdo a resultados de mediciones.

La sensibilidad del aire también caracteriza el efecto del aire sobre una edificación, y depende del tipo de terreno [10]. Para el EEEIE se asignó una sensibilidad de 0,25 renovaciones de aire por hora, de acuerdo a sus características y a la Tabla 3.8 que establece *Autodesk Ecotect Analysis*.

Construcción	Sensibilidad del aire [renovaciones de aire/hora]
Bien protegida	0,1
Razonablemente protegida	0,25
Algo sensible	0,5
Muy sensible	1,0
Sensible y expuesta	1,5

Tabla 3.8. Sensibilidad del aire de acuerdo a las características del edificio.

¹⁴ Concepto usado en arquitectura bioclimática para definir un modo de ventilación en edificios. Consiste en la presencia de zonas de alta y baja presión mediante la ubicación estratégica de aberturas (puertas y ventanas), de manera que el flujo de aire cruce de la forma más homogénea posible.

3.7.5. Tipo de sistema de climatización

En la Tabla 3.9 se especifican los tipos de sistemas de calefacción y refrigeración que se pueden definir para las zonas en *Autodesk Ecotect Analysis*.

Tipo de sistema	Descripción
Ninguno	Todas las ventanas y puertas se consideran cerradas y la única ventilación es a través de la tasa de renovaciones de aire definida [10].
Ventilación natural	Significa que durante el periodo operacional las condiciones del exterior son cercanas a las de la franja de confort definida, los ocupantes abren las ventanas y el intercambio de aire aumentará proporcionalmente al área de la ventana en la dirección y velocidad del viento [10].
Sistema de modo combinado	Se combina el sistema de aire acondicionado y la ventilación natural, de manera que el sistema HVAC se apaga cuando las condiciones externas se encuentran dentro de las condiciones definidas en el termostato. <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> asume que el sistema funciona y provee ventilación mecánica o las ventanas están abiertas, las dos situaciones no ocurren a la vez. Además, no se considera la energía usada en los conductos de aire cuando se calculan las cargas de calefacción y refrigeración, ya que se dan como cargas espaciales y no cargas de planta [10].
Aire acondicionado	El sistema de calefacción y refrigeración funciona cuando se requiera mantener la temperatura del aire de la zona entre los valores definidos del termostato durante el periodo operacional. Las ventanas nunca se abren, por lo que la única ventilación o infiltración es la que se define en la tasa de renovaciones de aire de la zona [10].
Sólo calefacción	Es el mismo caso del aire acondicionado, sólo con la componente de calefacción calculada [10].
Sólo refrigeración	Es el mismo caso del aire acondicionado, sólo con la componente de refrigeración calculada [10].

Tabla 3.9. Tipos de sistemas HVAC que se pueden asignar a una zona en *Autodesk Ecotect Analysis*.

En el caso del EEEIE se consideraron tres tipos de sistemas de climatización en las distintas zonas del edificio. Para los pasillos se definió ventilación natural, mientras que en las aulas se consideraron ventilación natural, sistema de modo combinado y aire acondicionado. Presentando la justificación y el objetivo de los sistemas de climatización simulados.

Tipo de zona	Sistema de climatización	Justificación
Pasillo	Ventilación natural	En los pasillos del edificio a ser analizados, no hay sistemas de refrigeración artificial instalados.
Aula	Ventilación natural (Simulación)	Si bien las aulas del EEEIE usan aires acondicionados de manera prácticamente permanente, se verificará el comportamiento térmico que se tendría si se prescindiera de ellos.
	Modo combinado (Sólo simulación)	Las simulaciones de modo combinado permitirán ver los ahorros energéticos que se tendrían si se aprovechara la ventilación natural durante el tiempo en que las condiciones naturales permitan mantener el confort en las aulas.
	Aire acondicionado (Existente)	Como es el sistema de climatización más usado en el EEEIE, servirá para simular las condiciones de operación más frecuentes, y conocer los consumos energéticos debidos al uso de aires acondicionados.

Tabla 3.10. Tipos de sistemas de climatización usados en el modelo del EEEIE.

La eficiencia tenida en cuenta para los aires acondicionados fue del 95%, y su horario de funcionamiento fue el mismo usado para la ocupación, pues se

considera que sólo se requiere emplear técnicas de climatización cuando las aulas están en operación.

3.7.6. Rango de temperaturas de confort

El rango de temperaturas de confort se usa para determinar si se tiene la temperatura deseada dentro de una zona y para operar los sistemas HVAC. Andrew Marsh recomienda usar en climas fríos una franja de 20°C – 26°C, y para climas cálidos una franja de 18°C – 26°C [10]. Como en Bucaramanga se tiene un clima cálido, se asignó una franja de confort de 18°C – 26°C para todas las zonas.

Para estimar este rango con mayor precisión, de acuerdo a las condiciones ambientales y costumbres de la comunidad universitaria, se debe realizar un estudio en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander que no está incluido en el alcance de este trabajo de grado.

Referencias Bibliográficas

- [1] R. Rojas, «Building information modelling: BIM,» 18 Marzo 2011. [En línea]. Available: <http://www.cmic.org/Archivos/Building%20Information%20Modeling%20BIM%20-%20INCONET%20-%20v1.5%20%2018-03-2011%20White%20Paper.pdf>. [Último acceso: 18 Mayo 2012].
- [2] Wikipedia: La enciclopedia libre, «Modelado de información de construcción,» 31 Enero 2012. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Modelado_de_informaci%C3%B3n_de_construcci%C3%B3n. [Último acceso: 18 Mayo 2012].
- [3] Remaz, Dilshan; Abdul, Roshida; Bin, Mohd. Tropical building design principles for comfortable indoor environment. Universidad Tecnológica de Malaysia. 2008. [En línea] Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/36500023/20/ECOTECT-Simulation-Geometric-Model>.
- [4] ADVANCED MODELLING - Importing CAD Geometry. [En línea] Disponible en: <http://wiki.naturalfrequency.com/archive/ecotect/tutorials/advanced-import.htm>.
- [5] Assael, David. BIM: Adios al CAD. [En línea] Disponible en: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2006/11/24/bim-adios-al-cad/>.
- [6] I. t. a. cube, «Your BIM Options: Archicad or Revit?,» 25 Noviembre 2009. [En línea]. Available: <http://vitteri.blogspot.com/2009/11/your-bim-options-archicad-or-revit.html>. [Último acceso: 18 Mayo 2012].
- [7] Graphisoft R&D Rt. El concepto de BIM. [En línea] Disponible en: <http://www.graphisoft.es/producto/archicad/>.
- [8] Graphisoft R&D Zrt. Reference Manual: Preparing ArchiCAD Models for Analysis in Ecotect. 2008. [En línea] Disponible en: http://download.graphisoft.com/ftp/download/ecotect/ArchiCAD_Model_Preparation_for_Ecotect.pdf.
- [9] Marsh, Andrew. Thermal Modelling: The ECOTECT Way. [En línea] Disponible en: <http://naturalfrequency.com/articles/thermalelements>.
- [10] Autodesk, Inc. Help Ecotect 2011. 2010.

- [11] Szokolay, Steven V. Introduction to architectural science: The basis of sustainable design. Elsevier Ltd. Segunda edición. Oxford. 2008 .
- [12] Ministerio de sanidad, servicios sociales e igualdad de España, «Guía técnica para la Prevención y Control de la Legionelosis en instalaciones - Humectadores,» 2004. [En línea]. Available: <http://www.msc.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/guia.htm>. [Último acceso: 5 Julio 2012].
- [13] Ministerio de Minas y Energía. Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público - RETILAP. 2010.
- [14] Blog de ingenieros industriales. Cálculo de cargas térmicas. [En línea] Disponible en: www.ingenierosindustriales.com.
- [15] GAMARRA Yezpez, Walter José. Diseño de sistema de climatización en salones de obras de arte. Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. 2005..

4. CREACIÓN DEL ARCHIVO DE DATOS METEOROLÓGICOS

El clima es uno de los factores que más influyen en las condiciones internas de una edificación, y determina la intensidad de radiación solar, viento y lluvia que afectan una región [1, 2]. Su efecto sobre la edificación se ve reflejado principalmente en su iluminación y ganancias de calor; y puede ser perjudicial o ventajoso para el confort de sus ocupantes, dependiendo de las características de las zonas [2].

Según las consideraciones de diseño de una edificación, se pueden reducir los efectos perjudiciales del clima y aumentar el nivel de aprovechamiento cuando resulte conveniente. Para ello, es necesario tener en cuenta las condiciones climáticas o meteorológicas del lugar en el que se ubica la edificación, lo cual se hace mediante la medición de los datos del clima [3].

Dado que una de las finalidades de *Autodesk Ecotect Analysis* es facilitar la toma de las decisiones de diseño descritas anteriormente, las condiciones climáticas del lugar en que se encuentra la edificación se incorporan a este análisis a partir de un archivo de datos meteorológicos creado por medio de la herramienta *Weather tool*, incluida en el software.

El proceso seguido para la creación del archivo del clima compatible con *Autodesk Ecotect Analysis*, se resume en la Figura 4.1; las etapas allí presentadas se exponen en este capítulo.

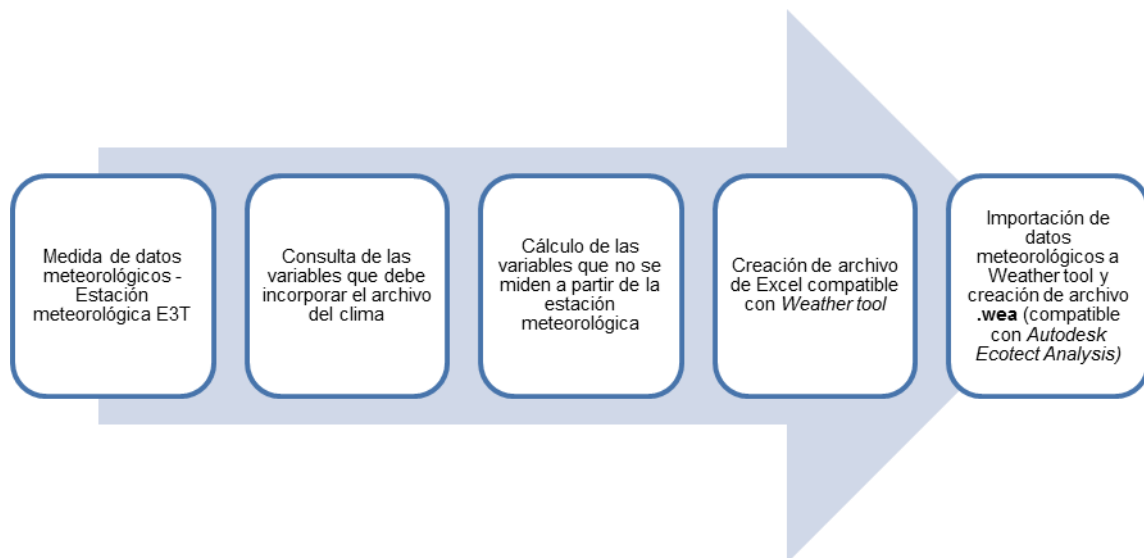


Figura 4.1. Procedimiento seguido para la creación del archivo del clima.

4.1 MEDICIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

Previo a la creación del archivo de datos meteorológicos, se debe contar con la monitorización de las variables climáticas requeridas para las simulaciones de *Autodesk Ecotect Analysis*, a fin de representar de forma precisa el clima que afecta la edificación. Para ello, se pueden consultar estaciones meteorológicas cercanas a la edificación, o instalar una estación meteorológica.

Las mediciones usadas para crear el archivo de datos meteorológicos tenido en cuenta en las simulaciones del EEEIE, fueron realizadas a partir de la estación meteorológica ubicada en la azotea del Edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), entre agosto 30 de 2010 y agosto 25 de 2011.

El equipo de medición utilizado es una unidad VANTAGE PRO-2 DAVIS, compuesta por los elementos mostrados en la Figura 4.2. Este equipo permite medir velocidad y dirección del viento, precipitación, temperatura exterior, humedad exterior, radiación ultravioleta y radiación solar; a partir de éstas, se pueden estimar de manera indirecta veinte (20) variables más [4].

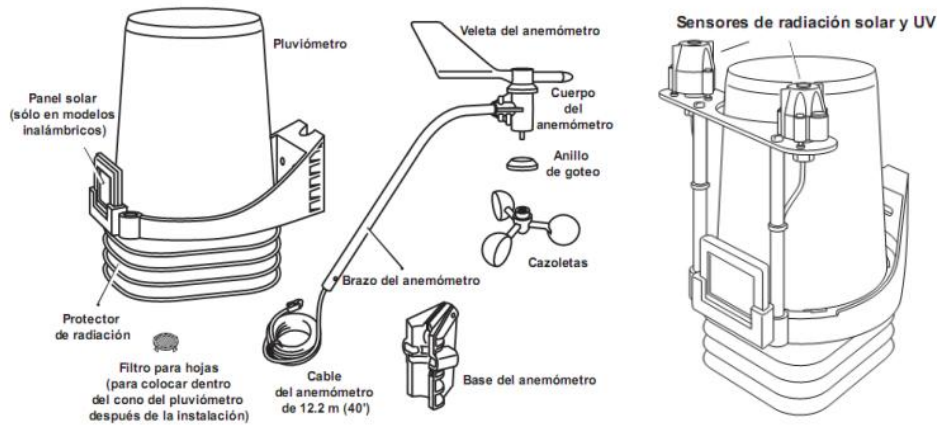


Figura 4..2. Componentes de la unidad VANTAGE PRO-2 DAVIS [4].

Cabe destacar que cuando se calibre el BIM del EEEIE será necesario realizar mediciones de temperatura en las aulas seleccionadas, con el fin de comparar los valores reales con los simulados por *Autodesk Ecotect Analysis*. Para ello, podrá usarse una termocupla o un equipo similar.

4.2. VARIABLES CLIMÁTICAS REQUERIDAS

Como se mencionó anteriormente, para la creación del archivo de datos meteorológicos del modelo se usó el software *Weather Tool 2011*, que es compatible con *Autodesk Ecotect Analysis* y viene incluido en el paquete de instalación.

De acuerdo al documento de ayuda de *Weather Tool*, para que los datos meteorológicos sean útiles en la mayoría de análisis, se requiere que sean tomados durante cada hora del día en un año completo. Estos no pueden ser promedios mensuales ni diarios, sino valores medidos cada hora del día. Los datos requeridos por *Weather Tool 2011* se definen en el ANEXO J y son [5]:

Mes del año [1-12]	Día del mes [1-31]
Hora del día [0-23]	Temperatura de bulbo seco [°C]
Humedad relativa [%]	Humedad específica [g/kg]
Temperatura de punto de rocío [°C]	Velocidad del viento [m/s]
Irradiancia solar normal directa [W/m ²]	Dirección del viento [°E of N]
Irradiancia solar horizontal global [W/m ²]	Precipitación [mm]
Irradiancia solar difusa global [W/m ²]	Nubosidad [-]

4.3. VARIABLES CLIMÁTICAS DE CÁLCULO INDIRECTO

A partir de una estación meteorológica se puede recopilar información de diversas variables climáticas, pero es posible que sea insuficiente para la creación del archivo del clima. En el caso de las variables meteorológicas desconocidas que dependen de variables conocidas se podrá establecer su comportamiento a partir cálculos matemáticos indirectos.

Teniendo en cuenta los datos medidos por la estación meteorológica ubicada en el Edificio E3T, se tiene que las variables no monitorizadas fueron:

- Humedad específica [g/kg]
- Irradiancia solar normal directa [W/m²]
- Irradiancia solar difusa global [W/m²]
- Nubosidad [fracción]

A continuación se describe el procedimiento y las consideraciones tenidas en cuenta para la obtención de los valores asociados a las variables anteriores.

4.3.1. Humedad específica

La humedad específica (H_{esp}) se relaciona con la humedad relativa (H_{rel}), que es el grado de saturación del aire a una temperatura dada, y se puede expresar matemáticamente como la razón entre la humedad específica (H_{esp}) y la humedad específica de saturación¹⁵ (H_{esat}) [6]. De acuerdo a esto, la humedad específica se puede definir como:

$$H_{esp} = \frac{H_{rel}}{100} * H_{esat} \quad (Ec. 4.1)$$

De la estación meteorológica se obtienen los valores de humedad relativa; por lo que, sólo falta obtener la humedad específica de saturación correspondiente a la temperatura de bulbo seco en el momento en que se realiza la medición. La Figura 4.3 muestra la relación entre la humedad específica de saturación y la temperatura de bulbo seco [6].

¹⁵ Humedad específica cuando se ha evaporado toda la masa de agua que puede contener el aire bajo unas condiciones dadas.

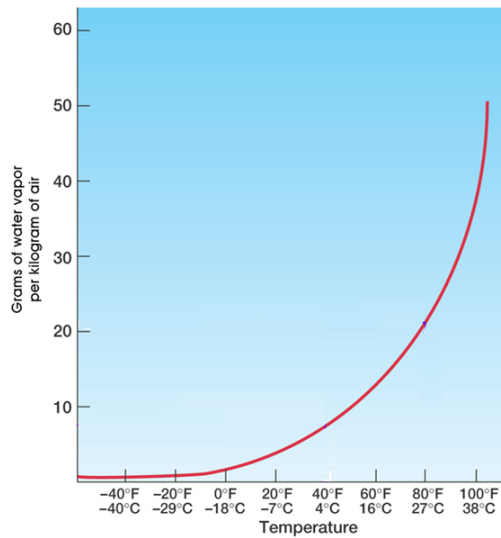


Figura 4.3. Humedad específica de saturación vs. Temperatura de bulbo seco [6].

Para realizar el cálculo de la humedad específica de saturación, se representó la gráfica anterior a partir de intervalos de temperatura de bulbo seco a los que corresponde una humedad específica estimada a partir de la Figura 4.3. En la Tabla 4.11 se muestran los valores usados.

Temperatura de bulbo seco [°C]	Humedad específica de saturación [g/kg]	Temperatura de bulbo seco [°C]	Humedad específica de saturación [g/kg]
18-18,5	13,1	24,5-25	19,5
18,5-19	13,6	25-25,5	20,1
19-19,5	14	25,5-26	20,7
19,5-20	14,4	26-26,5	21,2
20-20,5	15	26,5-27	22
20,5-21	15,2	27-27,5	22,6
21-21,5	15,8	27,5-28	23,4
21,5-22	16,1	28-28,5	24,1
22-22,5	16,7	28,5-29	24,9
22,5-23	17,2	29-29,5	25,7
23-23,5	17,7	29,5-30	26,6
23,5-24	18,4	30-30,5	27,3
24-24,5	18,9	30,5-31	28,5

Tabla 4.11. Humedad específica de saturación correspondiente a intervalos de temperatura.

Se usaron las funciones SI() e Y() de Excel para ubicar la temperatura de bulbo seco dada dentro de uno de los intervalos definidos, y, de esta manera, asignar el valor de humedad específica de saturación correspondiente.

Como ya se conoce la humedad específica de saturación y la humedad relativa, se puede aplicar la Ecuación 1 para hallar la humedad específica.

4.3.2. Irradiancia solar horizontal difusa

La irradiancia solar horizontal difusa se puede estimar a partir de la irradiancia solar global medida sobre una superficie horizontal. Para ello, se usa la relación K_t - K_d establecida por Collares-Pereira [7].

Para determinar la radiación solar horizontal difusa se debe conocer el valor de los coeficientes K_t y K_d . K_t depende de la irradiancia global horizontal¹⁶ (G_h) y de la irradiancia extraterrestre¹⁷ (G_0), y K_d se calcula a partir de K_t .

La radiación solar difusa horizontal (D_h) es el producto entre la radiación global horizontal (G_h), medida directamente por la estación meteorológica, y K_d . En el ANEXO K se especifican las fórmulas establecidas por el método Collares-Pereira para determinar D_h [7].

Se usó Excel para aplicar el método de Collares-Pereira, teniendo en cuenta que la irradiancia global horizontal es una de las variables medidas por la estación meteorológica y tomando el valor promedio de la irradiancia extraterrestre (1367 W/m²).

Inicialmente se calcula K_t para cada día del año, y a partir de su valor se elige la fórmula que se debe usar para el cálculo de K_d . Mediante las funciones $SI()$ y $Y()$, se realizó el cálculo correspondiente. Finalmente, se obtiene la radiación difusa horizontal, teniendo en cuenta el valor de K_d y la medición de la radiación solar global horizontal realizada por la estación meteorológica.

4.3.3. Irradiancia solar normal directa

La componente normal directa de la radiación solar (B_N) es la que se mediría sobre una superficie imaginaria de cara al Sol, de manera que cuando el Sol se mueve en el cielo la superficie de medición lo sigue; por lo cual, la dirección de la radiación incidente siempre es normal [8].

La irradiancia solar normal directa se calcula a partir de la ecuación [8]:

¹⁶ Cantidad total de radiación solar recibida por una superficie horizontal al terreno [13].

¹⁷ Irradiancia incidente fuera de la atmósfera terrestre. Su valor promedio es 1367 W/m², y varía en $\pm 3\%$ a lo largo del año, mientras la Tierra orbita alrededor del Sol.

$$B_N = \frac{B_H}{\cos(90-h)} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde: B_H : Irradiancia solar horizontal directa
 h : Altura solar

La irradiancia solar horizontal global (G_H) es la suma de la irradiancia solar directa horizontal (B_H) y difusa horizontal (D_H). La irradiancia solar horizontal directa se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$B_H = G_H - D_H \quad (\text{Ec. 4.3})$$

La altura solar (h), junto con el azimut (A_Z) solar, son los ángulos que determinan la posición solar en el sistema de coordenadas celestes. La altura solar es la distancia angular entre el horizonte del observador y el Sol [9]. Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$h = \text{sen}^{-1}(\text{sen}\delta \text{sen}\varphi + \text{cos}\delta \text{cos}\varphi \text{cos}\omega) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde: δ : Declinación [rad]
 Φ : Latitud [rad]
 ω : Ángulo horario [rad]

En el ANEXO L se describe con mayor profundidad el cálculo de la altura solar y las variables que inciden en ella.

4.3.4. Nubosidad

La estación meteorológica de la E3T no toma el dato de nubosidad, y éste no puede deducirse a partir de los parámetros que se tienen; por lo que, fue necesario recurrir a otra fuente para obtenerla.

Se revisaron los datos meteorológicos facilitados por la CDMB, que tampoco contenían esta variable, y los promedios mensuales medidos en el Aeropuerto Palonegro de Bucaramanga publicados por el IDEAM.

A partir de lo anterior, se decidió representar la nubosidad de acuerdo a los datos mensuales del IDEAM, expuestos en la Tabla 4.12; por lo tanto, se tiene un valor constante a lo largo del día, durante todos los días de un mes.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
NUBOSIDAD	4	5	5	6	6	6	5	6	6	6	6	5

Tabla 4.12. Medida mensual de nubosidad (octas) en el Aeropuerto Palonegro de Bucaramanga – IDEAM [10].

Como los datos del IDEAM se representan a partir de octas, es necesario convertir los valores a fracción de cielo cubierto que es lo que requiere *Weather Tool* [5], y teniendo en cuenta que una octa corresponde a la octava parte de la bóveda del cielo cubierta por nubes, se realiza la conversión a fracción de los datos del IDEAM, según lo mostrado en la Tabla 4.13 [11].

Octas	Fracción	Definición	Categoría
0	0	Despejado	Buen tiempo
1	0,125	1/8 de cielo cubierto o menos, pero no cero	Buen tiempo
2	0,25	2/8 de cielo cubierto	Buen tiempo
3	0,375	3/8 de cielo cubierto	Parcialmente nuboso
4	0,5	4/8 de cielo cubierto	Parcialmente nuboso
5	0,625	5/8 de cielo cubierto	Parcialmente nuboso
6	0,75	6/8 de cielo cubierto	Nuboso
7	0,875	7/8 de cielo cubierto o más, pero no 8/8	Nuboso
8	1	8/8 de cielo completamente cubierto, sin claros	Cubierto

Tabla 4.13. Equivalencia entre octas y fracción de cielo cubierto.

Para asignar la fracción correspondiente a cada mes del año se usó una fórmula en Excel compuesta por las funciones condicionales SI() y Y().

4.4. CREACIÓN DE ARCHIVO DE EXCEL COMPATIBLE CON *WEATHER TOOL*

Como ya se tiene la información requerida por el archivo meteorológico, se procede a organizarla en un documento de Excel, a partir del cual, se crea el archivo delimitado por comas que se importa a *Weather Tool*.

A continuación se explica el procedimiento seguido para adecuar los datos que no se encuentran en el formato o unidades compatibles con *Autodesk Ecotect Analysis*, y las consideraciones a tener presentes al unificar la información meteorológica suministrada por la estación de la E3T y los datos calculados.

4.4.1. Cambio de formato de datos y conversión de unidades

Los datos que debieron ser cambiados de formato para permitir su interpretación correcta al importarlos a *Autodesk Ecotect Analysis* fueron las fechas, horas y dirección del viento. A continuación se describe el procedimiento realizado.

a) Mes, día y hora

Aunque estas variables están especificadas en los datos de las mediciones meteorológicas realizadas, el formato en que se encuentran no es compatible con el requerido por *Weather Tool*, ya que la fecha se define como DD / MM / AA y las horas se especifican como HH:MM A.M. / P.M.

Las fechas se convirtieron por medio de las funciones DIA () y MES () que, al aplicarse a las celdas con el formato guardado por la estación meteorológica, dan como resultado el día correspondiente representado como un número entre 1 y 31, y el mes como un número entre 1 y 12.

Para tener las horas del día representadas por un número entero entre 0 y 23, se extrajo el valor asociado a la hora correspondiente con la función VALOR () de Excel, mediante la cual se obtiene el número de la hora dividido entre las 24 horas totales. Luego se multiplicó este valor por 24 para obtener la hora correspondiente. Por ejemplo, si la hora que aparece en los datos meteorológicos es 3:00 PM, el proceso que se realizaría es el siguiente:

$$VALOR(3:00 P.M.) = \frac{15}{24} = 0,125$$

$$HORA = VALOR(HORA) * 24 = 0,125 * 24 = 15$$

b) Dirección del viento

En el archivo de la estación meteorológica de la E3T se representa la dirección del viento de acuerdo a la convención establecida por la rosa de los vientos mostrada en la Figura 4.4 [12]. Como *Autodesk Ecotect Analysis* requiere que la dirección del viento se defina en grados, medidos a partir del norte en el sentido de las manecillas del reloj, se deben modificar estos valores [5].

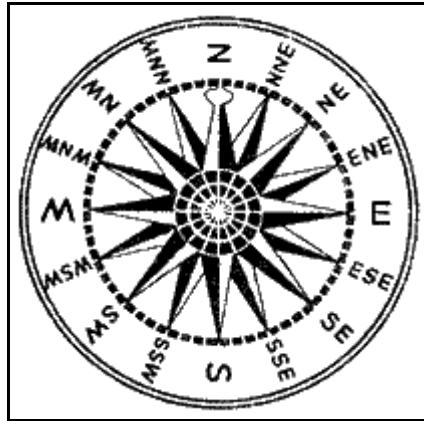


Figura 4.4. Rosa de los vientos.

La equivalencia entre la nomenclatura de la rosa de los vientos y los grados medidos a partir del norte, tenida en cuenta para ajustar el formato de la dirección del viento se presenta en la Tabla 14.4.

Dirección del viento	Dirección del viento [°]	Dirección del viento	Dirección del viento [°]
N	0,0 – 360,0	S	180,0
NNE	22,5	SSW	202,5
NE	45,0	SW	225,0
ENE	67,5	WSW	247,5
E	90,0	W	270,0
ESE	112,5	WNW	292,5
SE	135,0	NW	315,0
SSE	157,5	NNW	337,5

Tabla 14.4 Dirección del viento.

4.4.2. Organización de los datos meteorológicos en un archivo delimitado por comas

Para crear el archivo de datos meteorológicos compatible con *Autodesk Ecotect Analysis*, se deben organizar los datos en un archivo de Excel. Si bien no existe un orden predeterminado para organizar las variables meteorológicas, se debe tener presente la columna que ocupa cada una de ellas y sus unidades al momento de importar el archivo a *Weather Tool*.

4.5. CREACIÓN DE ARCHIVO .WEA CON WEATHER TOOL

Para crear el archivo de datos meteorológicos con *Weather Tool*, se empieza por importar el archivo **.CVS** creado previamente; esto se hace abriendo el archivo

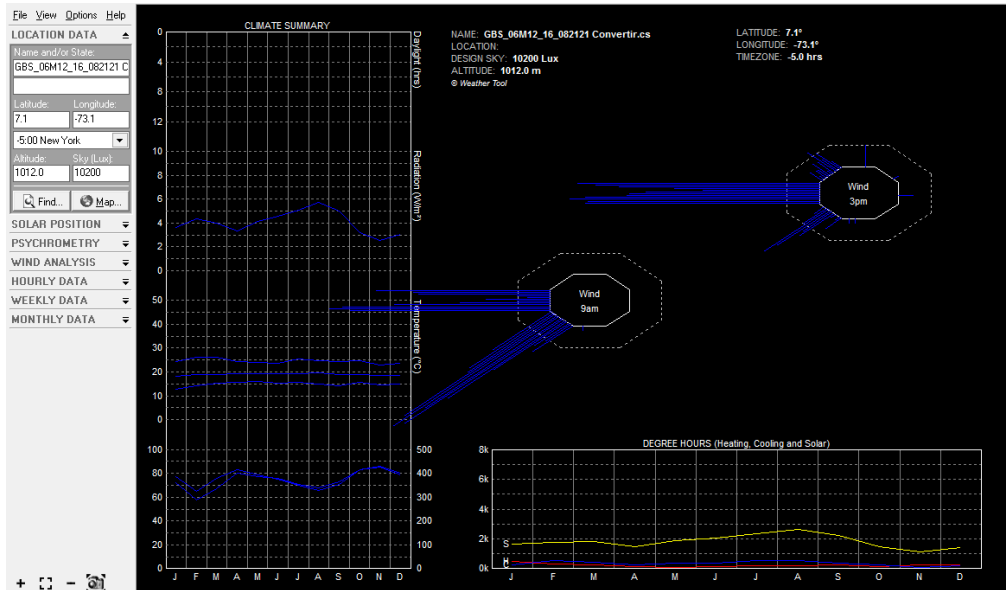


Figura 4.6. Entorno de Weather Tool después de la importación.

En los campos de la izquierda de la pantalla se define el nombre del lugar, latitud, longitud, zona horaria y altura sobre el nivel del mar. Los datos definidos para el EEEIE se muestran en la Tabla 4.5.

Latitud	7,133°
Longitud	-73,133°
Zona horaria	-5:00 GTM
Altura sobre el nivel del mar	1012,0 m.s.n.m.

Tabla 4.15. Datos de ubicación del EEEIE.

Para terminar la creación del archivo meteorológico se guardan los datos como archivo **.wea**, que puede ser ejecutado en *Autodesk Ecotect Analysis*.

Referencias Bibliográficas

- [1] D. Gatón Reyes, «El clima en la construcción,» [En línea]. Available: <http://www.arqhys.com/contenidos/construccion-clima.html>. [Último acceso: 24 Julio 2012].
- [2] R. Convit H., «El clima,» 24 Noviembre 2005. [En línea]. Available: <http://convit.blogspot.com/2005/11/el-clima.html>. [Último acceso: 24 Julio 2012].
- [3] A. M. Arruti, «La Construcción y el Clima,» 27 Junio 2011. [En línea]. Available: <http://www.spaingbc.org/noticias/pdf/LA%20CONSTRUCCION%20Y%20EL%20CLIMA%20AMA%2001.pdf>. [Último acceso: 24 Julio 2012].
- [4] G. A. Osmá Pinto, *Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander*, Bucaramanga, 2011.
- [5] Autodesk, Inc., «Weather tool 2011- Help file,» 2010.
- [6] Newman, Lynn E., «Moisture, Stability, and Precipitation,» 15 Diciembre 2006. [En línea]. Available: http://web.gccaz.edu/~lnewman/gph111/topic_units/moisture/moisture_stabil_prec/moisture_stabil_prec2.html.

[Último acceso: 1 Julio 2012].

- [7] V. Ruiz Hernández y M. Silva Pérez, «Radiación solar - Medidas y cálculos,» [En línea]. Available: <http://es.scribd.com/doc/85585358/Texto-de-Radiacion-Solar>. [Último acceso: 1 Julio 2012].
- [8] A. Marsh, «Solar radiation: Components,» [En línea]. Available: <http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/SolarRadiation/Components>. [Último acceso: 3 Julio 2012].
- [9] UPME-IDEAM, «Atlas de radiación solar de Colombia - Apéndice B,» 2005. [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/8-Apendice_B.pdf. [Último acceso: 3 Julio 2012].
- [10] IDEAM, «Cartas climatológicas medias mensuales - Aeropuerto Palonegro (Bucaramanga),» Junio 2000. [En línea]. Available: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/bucara/tabla.htm>. [Último acceso: 2 Julio 2012].
- [11] «Definición de octas,» [En línea]. Available: <http://wwis.inm.es/oktas.htm>. [Último acceso: 2 Julio 2012].
- [12] «Wind direction,» [En línea]. Available: <http://www.smwireless.net/w.htm>. [Último acceso: 3 Julio 2012].
- [13] 3TIER, «What is Global Horizontal Irradiance?,» [En línea]. Available: <http://www.3tier.com/en/support/solar-prospecting-tools/what-global-horizontal-irradiance-solar-prospecting/>. [Último acceso: 5 Octubre 2012].

5. GUIA PARA LA INTERPRETACIÓN DE SIMULACIONES REALIZADAS CON *AUTODESK ECOTECH ANALYSIS*

Autodesk Ecotech Analysis es una herramienta computacional que permite ejecutar un gran número de simulaciones térmicas, lumínicas y de radiación solar. La exploración de cada una de ellas constituye una labor compleja desde el punto de vista del tiempo requerido y los conceptos, en general adquiridos durante un plan de ingeniería, que se requieren para comprender el valor de los resultados y gráficos que arroja el software.

Por ello, el principal objetivo de este capítulo consiste en facilitar la apropiación de conceptos y la comprensión de las simulaciones de *Autodesk Ecotech Analysis*, sobre todo a aquellos estudiantes que desarrollarán las siguientes fases planteadas en la propuesta metodológica para el análisis del EEEIE.

Para facilitar la exposición y comprensión de los conceptos y consideraciones propuestos, se toma como ejemplo las simulaciones *a priori* del aula 515 del EEEIE. En la Figura 5.1 se muestran cada una de las simulaciones que hacen parte del capítulo, entre las simulaciones térmicas a realizar se tienen confort térmico, temperatura interna, cargas espaciales, distribución de ganancias térmicas individuales; entre las simulaciones de radiación solar se ejecutan las simulaciones de exposición solar y derecho a la luz; y por último, las simulación de iluminación natural.

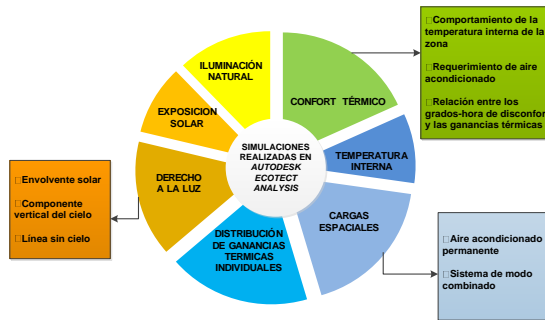


Figura 5.1. Simulaciones a realizar con *Autodesk Ecotect Analysis*.

5.1. CONFORT TÉRMICO

Existen numerosos métodos para medir el nivel de confort, entre los que se encuentra el método del balance energético en estado estable, el modelo de dos nodos y los métodos adaptativos [1]. Como se mencionó en el Capítulo 1, *Autodesk Ecotect Analysis* permite conocer el nivel de confort usando métodos adaptativos, para lo cual tiene en cuenta un rango de temperaturas ambiente óptimas [2]. Es decir, que sólo si la temperatura ambiente de la zona analizada se encuentra dentro de la franja de confort definida, se considera que las condiciones garantizan el confort de sus ocupantes.

Para el análisis del EEEIE, la franja de confort se estableció según el modelo de confort adaptativo con ventilación natural; ya que, de las opciones que ofrece *Autodesk Ecotect Analysis*, descritas en el ANEXO C, es el que mejor se ajusta a las condiciones particulares del EEEIE, al considerar el potencial de ventilación natural de la edificación. Como medida del desconfort se usaron los grados-hora de desconfort; pues, según la información del ANEXO M es una medida indirecta de los requerimientos de enfriamiento y calefacción de la zona [2].

El análisis de grados-hora de desconfort que muestra *Autodesk Ecotect Analysis* consiste en un gráfico de barras en cuyo “eje x” se indican los meses del año, y en “eje y” los grados-hora de desconfort. Si las barras son rojas significa que el desconfort es resultado de temperaturas demasiado altas y al contrario si éstas son azules.

Es importante resaltar que el tipo de sistema HVAC del aula 515 se definió como ventilación natural, pues es el único caso en el que tiene sentido hablar de disconfort. Con los demás sistema HVAC se garantiza que la temperatura de la zona está dentro de la franja de confort continuamente.

En la Figura 5.2 se presenta el gráfico de grados-hora de disconfort del aula 515 del EEEIE para cada mes del año, como se menciona en el ANEXO M, los grados de disconfort se calculan como la diferencia entre la temperatura de bulbo seco externa y la temperatura de confort definida.

Autodesk Ecotect Analysis lo calcula de forma horaria, por ejemplo, una hora determinada estuvo cuatro grados por encima de la franja de confort, ésta contribuirá con cuatro grados-hora al total. Al sumar los aportes de cada hora del día y luego las de todo los días del mes se obtiene datos de cada uno de los meses, como se muestra en el mes de noviembre que tiene valor de 600 grados-hora.

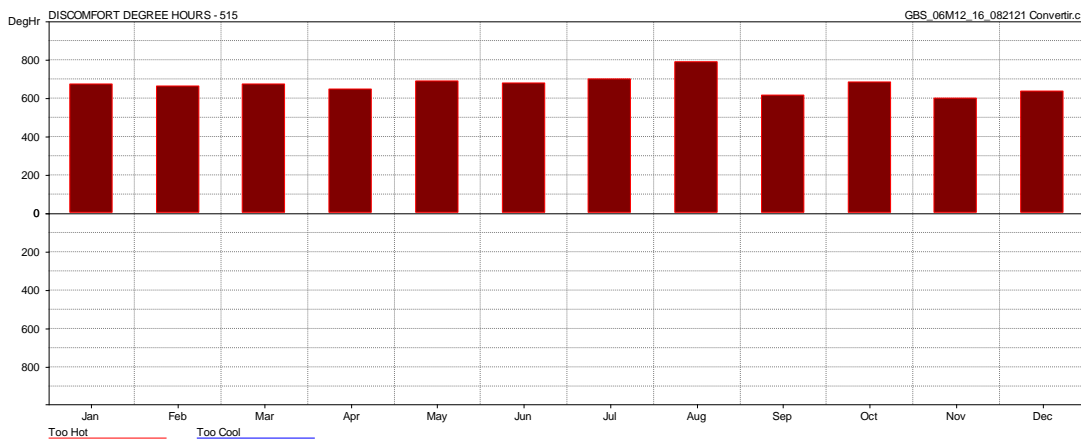


Figura 5.2. Simulación de grados-hora de disconfort del aula 515.

A partir del gráfico de grados-hora arrojado por *Autodesk Ecotect Analysis* se puede extraer información sobre el comportamiento térmico de un aula dada del EEEIE. Algunos de los parámetros que pueden analizarse son:

- Comportamiento de la temperatura interna de la zona.
- Requerimiento de aire acondicionado.
- Relación entre los grados-hora de disconfort y las ganancias térmicas.

A continuación se presenta la interpretación de los parámetros anteriores, a partir de la Figura 5.2, con el fin de que sea un ejemplo de cómo se podría hacer al tener el modelo del EEEIE calibrado.

5.1.1. Comportamiento de la temperatura interna de la zona

En la Figura 5.2 se puede ver que los grados-hora de discomfort mensuales son muy similares durante la mayor parte del año, lo que quiere decir que la temperatura del aula presenta comportamiento cuasi estático, sin marcadas diferencias de acuerdo a la época. Esto tiene relación con las condiciones meteorológicas y la ubicación geográfica del EEEIE, pues a pesar de que el clima varía continuamente, la temperatura se mantiene dentro de un rango cuasi constante como se puede ver en la Figura 5.3, que presenta la temperatura promedio mensual de bulbo seco calculada a partir del archivo meteorológico del EEEIE.

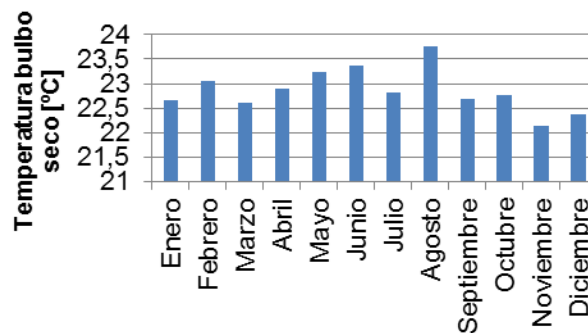


Figura 5.3. Promedio mensual de la temperatura de bulbo seco.

También se puede ver que la Figura 5.3, de temperatura de bulbo seco promedio mensual, presenta una tendencia similar al comportamiento de los grados-hora de discomfort, siendo agosto el mes en que las temperaturas fueron mayores y en noviembre las menores. Por lo tanto, se puede decir que en el caso del aula 515, la temperatura de bulbo seco y la temperatura interna de la zona se encuentran relacionadas. Esto indica que los factores que determinan la temperatura ambiente son los que más inciden en la temperatura dentro del aula, entre los que se encuentran la radiación solar y el movimiento del aire, en

consecuencia se tienen que las condiciones del espacio interior como ocupación y equipos instalados, tienen un efecto secundario.

5.1.2. Requerimiento de aire acondicionado

Los requerimientos de energía eléctrica para la climatización de un espacio dependen del volumen de aire que se debe enfriar, el tiempo de funcionamiento y la cantidad de calor que se debe extraer [3, 4].

Existe una relación directamente proporcional entre los grados-hora y el consumo energético anual de los aires acondicionados [5], pues tienen en cuenta la cantidad de grados centígrados que se debe disminuir la temperatura de la zona para mantener el confort térmico y, a su vez, el tiempo en el que se requiere el funcionamiento del aire acondicionado porque características del ambiente exterior al edificio no son favorables para la climatización.

Como el aula 515 presenta un comportamiento más o menos constante de grados-hora a lo largo del año, se tiene una ventaja al momento de elegir el aire acondicionado, pues su capacidad va a ser adecuada para mantener el nivel de confort durante cada mes del año, sin necesidad de sobredimensionarlo considerablemente con el fin de que su capacidad sea tal que funcione correctamente en la condición más desfavorable, es decir, cuando se tengan las mayores temperaturas.

5.1.3. Relación entre los grados-hora de disconfort y las ganancias térmicas

Como los grados-hora de disconfort dependen de la temperatura interna de la zona y ésta a su vez de las ganancias y pérdidas térmicas, es interesante analizar la relación que existe entre ellos. A partir de ello se pueden distinguir las fuentes de ganancias térmicas que inciden en mayor grado en el confort de la zona, y, de ser posible, tomar medidas para reducir su efecto.

En la Figura 5.4 se muestran las ganancias térmicas del aula 515 durante un año y en el ANEXO N se presenta el valor mensual de cada una de ellas.

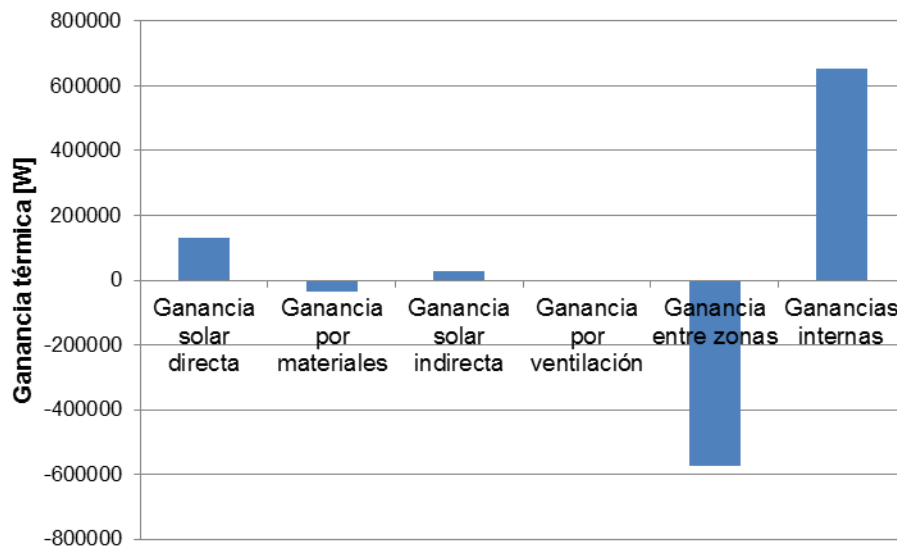


Figura 5.4. Ganancias térmicas anuales del aula 515.

Como se pudo observar previamente, la mayor parte de las ganancias térmicas del aula 515 son las internas, mientras que las mayores pérdidas se deben al intercambio de calor entre zonas. A pesar de ello, el comportamiento de los grados-hora a lo largo del año no parece tener una relación significativa con ellas, como se puede ver al comparar los gráficos de estas ganancias, presentados en el ANEXO N. Esto ocurre porque las ganancias internas y las pérdidas entre zonas tienen una magnitud y distribución similar a lo largo del año, anulándose casi por completo entre sí.

Al comparar el comportamiento de los grados-hora de discomfort con las ganancias térmicas, se hace evidente que las ganancias solares directas e indirectas son las que más influyen la temperatura interna del aula 515. Según los datos evaluados los meses de mayor y menor cantidad de grados-hora y ganancias son agosto y noviembre respectivamente.

5.2. TEMPERATURA INTERNA

Autodesk Ecotect Analysis permite conocer el comportamiento de la temperatura de una zona de dos maneras diferentes: con los valores instantáneos a lo largo del día, o con una distribución anual de temperaturas. Debido a que al realizar un diseño interesa más el comportamiento general de la edificación, y no para un día en particular, se recomienda utilizar la segunda estrategia.

En este tipo de simulación se muestra la frecuencia anual (número de horas) con que una temperatura (°C) se presenta al interior de la zona, teniendo en cuenta todas las horas del día.

Es posible contrastar la temperatura externa (proporcionada por medio del archivo del clima), que aparece como una línea punteada, con la temperatura interna de la zona, mostrada como una línea continua del color correspondiente a la zona [2]. En la Figura 5.5 se presenta la distribución de temperatura del aula 515.

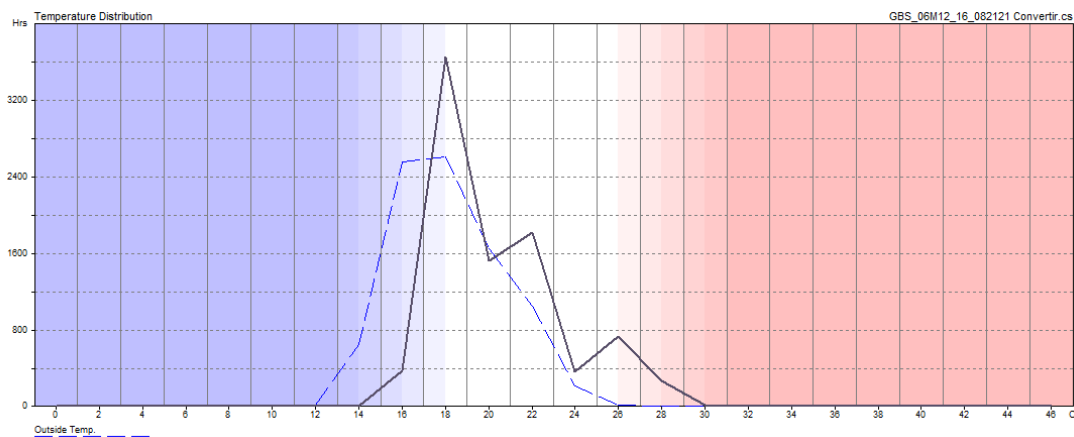


Figura 5.5. Distribución anual de temperatura del aula 515.

Las tres bandas que aparecen en el fondo de la gráfica indican el confort relativo de la zona. La franja azul representa las temperaturas por debajo de la franja de confort definida; mientras que, la franja rosa muestra las temperaturas por encima de la franja. Idealmente, la curva debería estar definida dentro de la banda blanca o franja de confort [2].

Las simulaciones para el aula 515 se realizan bajo el régimen de ventilación natural, pues cuando se tiene en cuenta el Aire Acondicionado, el comportamiento térmico de la zona siempre se encontrará en la banda de confort.

En la Figura 5.5 se puede observar que la mayor parte del área de la distribución de temperatura anual se encuentra dentro del rango de confort definido, por lo que el tiempo en el cual sería necesario el uso de un sistema de aire acondicionado solamente del orden del 17,8%. Esto indica que es posible lograr una disminución importante del consumo energético, siempre y cuando se aprovechen las condiciones climáticas para mantener el nivel de confort térmico en el aula.

Es interesante observar que la temperatura al interior del aula 515 siempre es superior a la temperatura ambiente. Esto se explica porque, las ganancias térmicas son mayores a las pérdidas térmicas, generando un aumento en la temperatura interna del aula.

5.3. 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 climatación [56]. Si bien es proporcional al consumo energético requerido por los sistemas HVAC¹⁸, para determinarlo también se requiere conocer la eficiencia de los equipos usados, y éste cálculo no es realizado directamente por *Autodesk Ecotect Analysis* [7]. Un sistema ineficiente, a pesar de que entrega la misma carga, requeriría una mayor cantidad de energía eléctrica que uno eficiente [2].

¹⁸ Acrónimo en inglés de *Heating, Ventilating and Air Conditioning* (Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado), que engloba el conjunto de métodos y técnicas para el tratamiento del aire en cuanto a su enfriamiento, calentamiento, humidificación, calidad, movimiento, etc [15].

Autodesk Ecotect Analysis realiza el cálculo de cargas espaciales por medio del método de admitancias CIBSE [8], 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 (Watt-hora) requeridas para las zonas seleccionadas.

Debido a que esta simulación sólo aplica cuando se define un sistema HVAC, se pueden considerar dos escenarios de funcionamiento de la zona: con aire acondicionado¹⁹ y sistema de modo combinado²⁰. La razón por la cual conviene analizar estas situaciones es que al compararlas se aprecian, indirectamente, los ahorros energéticos que se pueden lograr usando el aire acondicionado únicamente cuando las condiciones ambientales externas no sean suficientes para garantizar el confort de la zona.

A continuación se realiza el análisis de la carga espacial requerida por el aula 515 cuando funciona con aire acondicionado permanentemente o con sistema de modo combinado. Dado que el modelo aún no está calibrado, los resultados no son confiables, pero se realiza su interpretación a manera de ejemplo para que sea una guía cuando se realicen las simulaciones definitivas del EEEIE.

5.3.1. Aire acondicionado permanente

En la Figura 5.6 se presenta la distribución de cargas espaciales del aula 515 cuando funciona con aire acondicionado permanente.

¹⁹ El sistema de calefacción y refrigeración funciona cuando se requiera mantener la temperatura del aire de la zona entre los valores definidos del termostato durante el periodo operacional. Las ventanas nunca se abren, por lo que la única ventilación o infiltración es la que se define en la tasa de renovaciones de aire de la zona [7].

²⁰ Se combina el sistema de aire acondicionado y la ventilación natural, de manera que el sistema HVAC se apaga cuando las condiciones externas se encuentran dentro de las condiciones definidas en el termostato. *Autodesk Ecotect Analysis* asume que el sistema funciona y provee ventilación mecánica o las ventanas están abiertas, las dos situaciones no ocurren a la vez. Además, no se considera la energía usada en los conductos de aire cuando se calculan las cargas de calefacción y refrigeración, ya que se dan como cargas espaciales [7].

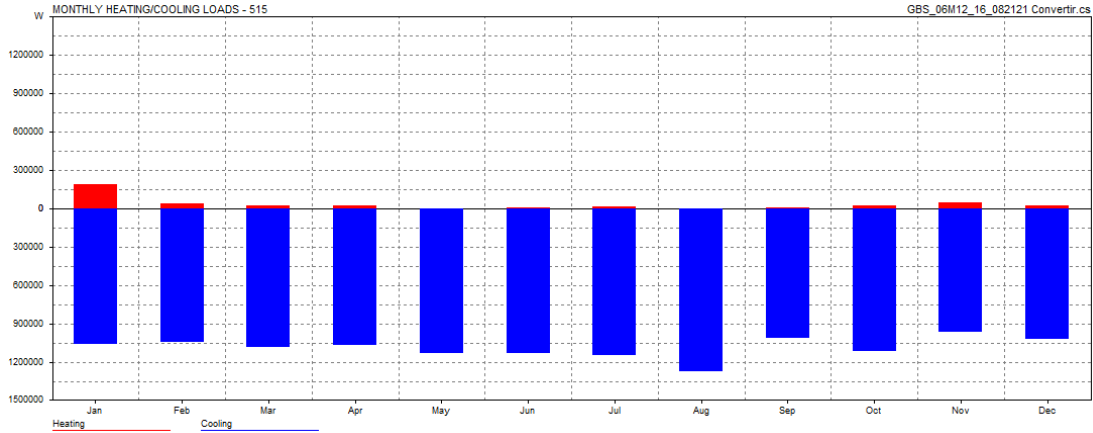


Figura 5.6. Cargas espaciales mensuales del aula 515 – Aire acondicionado.

La mayor parte de las cargas espaciales se deben a la necesidad del equipo de aire acondicionado para refrigerar la zona, y su comportamiento es similar al que se presenta en la Figura 5.2 de grados-hora de discomfort presentado anteriormente. En este caso el gráfico se invierte respecto al eje horizontal, pues ya no se representa la temperatura que se debe extraer del ambiente, sino la carga, de refrigeración o calefacción, requerida para que se encuentre dentro de la franja de confort.

A partir del gráfico se comprueba la suposición hecha previamente, al analizar el confort térmico del aula 515, pues el requerimiento de aire acondicionado es casi constante durante todo el año y, como se dijo, esto es una ventaja al seleccionar el equipo.

En este gráfico aparecen requerimientos de calefacción que no se pudieron prever al analizar los grados-hora de discomfort del aula 515. Esta situación se debe a que *Autodesk Ecotect Analysis* realiza el análisis de discomfort únicamente cuando hay personas dentro del aula y, de manera contraria, las temperaturas exteriores más bajas ocurren en horas durante las que no se definió ninguna ocupación: en la noche y en la madrugada.

5.3.2 Sistema de modo combinado

En la Figura 5.7 se presenta el gráfico de cargas espaciales del aula 515 del EEEIE cuando se usa aire acondicionado y calefacción, únicamente, en los momentos en que las condiciones climáticas no son adecuadas para lograr las condiciones de confort térmico.

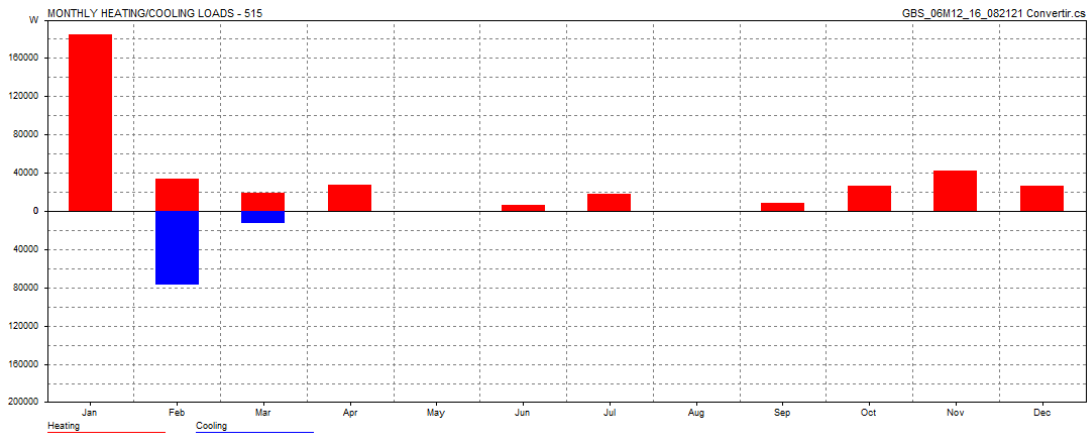


Figura 5.7. Cargas espaciales mensuales del aula 515 – Sistema de modo combinado.

El requerimiento anual de cargas de calefacción es prácticamente el mismo del sistema anterior (410,8 kWh con aire acondicionado y 393,1 kWh en el sistema de modo combinado), mientras que el requerimiento de refrigeración se reduce casi por completo. Si se usa el sistema de modo combinado se realiza un ahorro del 90,3 % con respecto al uso de aire acondicionado

Si bien no se puede afirmar, porque el modelo del EEEIE no se encuentra calibrado, se puede suponer para los momentos en que la temperatura es muy baja para los requerimientos de confort del aula, el ambiente exterior es tanto o más frío, por lo que no se puede usar para lograr el confort. De ser así, significaría que en los momentos que se siente frío en el aula 515 las condiciones exteriores son las que tienen un efecto mayor sobre la temperatura interna.

En el caso de los requerimientos de refrigeración ocurre lo contrario, los factores que aportan ganancias de calor pueden ser contrarrestados con las condiciones ambientales externas a la edificación durante la mayor parte del tiempo.

En términos generales, se observa que al usar del sistema de modo combinado se requiere sólo el 3,6% de la carga necesaria para mantener el confort con el sistema de aire acondicionado. De manera que resulta más eficiente, energéticamente, el uso de un sistema de ventilación mixta, que aprovecha las condiciones climáticas.

5.4. DERECHO A LA LUZ

El derecho a la luz (*Right to light*) se establece en la ley británica cómo la forma de garantizar que edificaciones nuevas, construidas cerca a 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 [7]. A pesar de que en la ley colombiana no se define una medida equivalente, se considera la normativa británica como referencia para conocer el impacto producido por los elementos cercanos al EEEIE sobre el acceso a la luz natural de la edificación, teniendo en cuenta que *Autodesk Ecotect Analysis* la toma como base para su simulación.

Si bien es bueno que no se viole el derecho a la luz natural de una edificación, también puede llegar a representar un inconveniente lumínico y térmico dependiendo de la intensidad con la que llegue la luz solar a las ventanas.

Es un inconveniente lumínico porque la luz solar llegará a la fachada casi en su totalidad, por lo que habrá momentos del día en épocas de año cuando la radiación solar sea directa sobre las ventanas y produzca deslumbramiento a los ocupantes.

Desde un punto de vista térmico, la desventaja es la ganancia de calor debida a la radiación solar a través de los vidrios, y con ello, el aumento del requerimiento de climatización por el sistema de aire acondicionado.

En el ANEXO Ñ se describe el procedimiento para el análisis del derecho a la luz natural a partir de *Autodesk Ecotect Analysis*.

Se consideran como objetos que pueden obstruir la luz natural que llega al EEEIE los árboles cercanos a la edificación, el Edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones – E3T, la Casona la Perla, el Edificio del Instituto de Lenguas Idiomas, y el Edificio Mamitza Bayer (Diseño industrial). Estos objetos fueron incluidos en el BIM.

A continuación se presentan las simulaciones realizadas al EEEIE para conocer la forma en que los objetos adyacentes afectan su derecho a la luz.

5.4.1. Envoltente solar

La envoltente de una edificación 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 [9]. En la Figura 5.8 se muestra la envoltente solar del aula 515 del EEEIE generada a partir de *Autodesk Ecotect Analysis*.

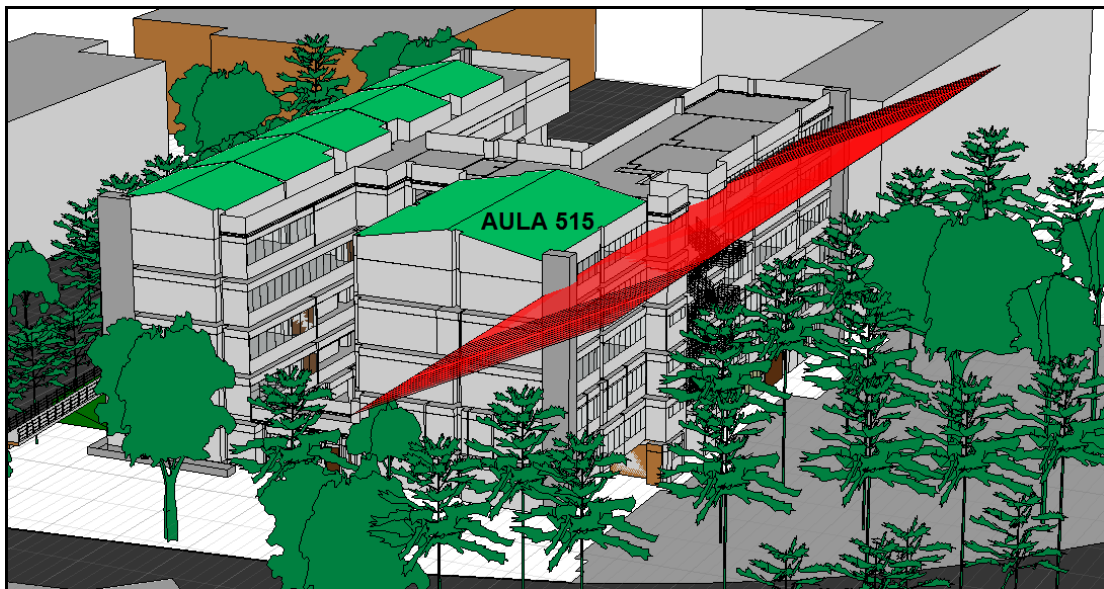


Figura 5.8. Envoltente solar del aula 515 del EEEIE.

La envoltente del aula 515 es el plano rojo sobre el cual se encuentran los objetos que obstruyen parte de la luz solar que pasa a través de las ventanas. La Figura 5.8 permite ver que ninguna obstrucción al EEEIE es

suficientemente alta para afectar el nivel de iluminación al interior del aula. Sin embargo, esto no implica que se tengan las condiciones adecuadas de iluminación, ya que puede haber momentos en que se produzca deslumbramiento por exceso de luz solar pasando a través de las ventanas.

Si bien la *Building Research Establishment* (BRE) establece que no es necesario revisar la componente vertical del cielo ni la línea sin cielo, pues no se viola el derecho a la luz según el primer criterio, se realizarán los siguientes análisis para verificarlo [7].

5.4.2. Componente vertical del cielo

La componente vertical del cielo (*Vertical Sky Component VSC*) es una medida establecida por la BRE 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. Un VSC del 27% o mayor se requiere para tener un buen aprovechamiento de la luz natural [10].

En la Figura 5.9 se muestran los resultados del cálculo de la VSC realizado por *Autodesk Ecotect Analysis* para cada fachada del EEEIE. Los valores del VSC se presentan gráficamente sobre las ventanas del EEEIE, teniendo en cuenta los valores asociados a cada color de acuerdo a la escala presentada en la parte inferior.

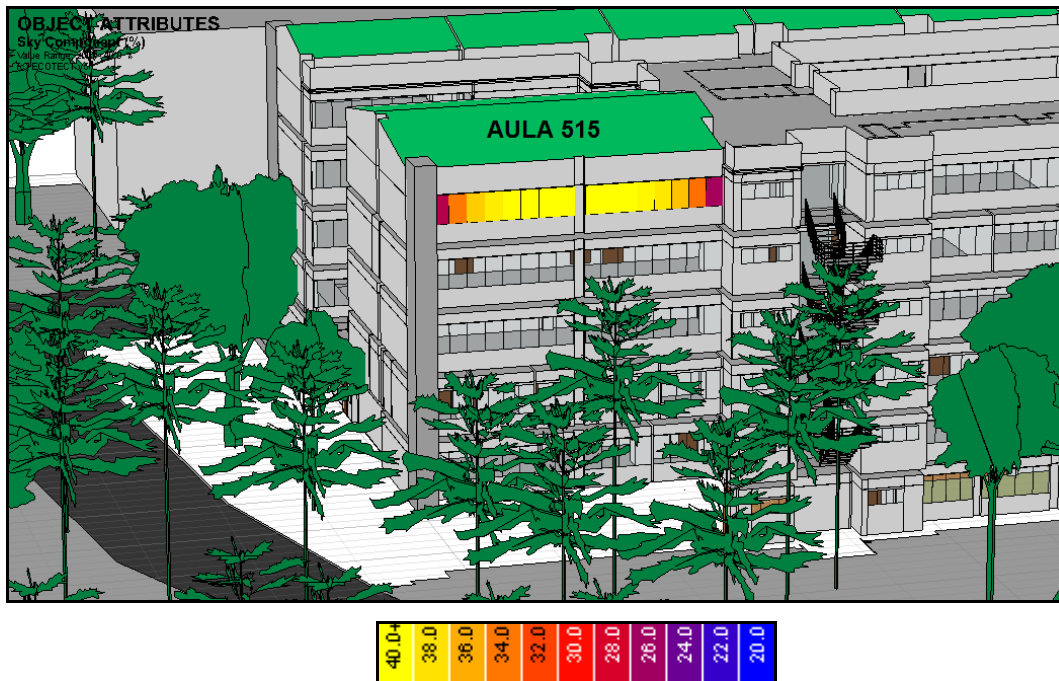


Figura 5.9. Resultados del cálculo del VSC en el aula 515 del EEEIE.

La simulación del VSC muestra que a la mayoría de las ventanas del aula 515 llega suficiente luz natural, pues presentan un VSC mayor al 27%. Las ventanas de las esquinas, sufren una obstrucción mayor de la luz natural debido a las columnas exteriores del EEEIE, pero aun así su VSC es significativo (26%).

Considerando que la mayoría de ventanas tienen un VSC mayor al 40%, se puede afirmar que el aula 515 tiene suficiente acceso a la luz natural.

5.4.3. Línea sin cielo

La línea sin cielo es el punto más allá del cual no se puede ver directamente ninguna parte del cielo a través de las ventanas de una habitación. Para calcularlo se genera una red de análisis (*analysis grid*) sobre el área del piso en cada habitación y se ejecuta el cálculo de la línea sin cielo en *Autodesk Ecotect Analysis* [7]. La BRE plantea que esta línea no debe ser afectada significativamente por el nuevo edificio.

Lo que hace *Autodesk Ecotect Analysis* para determinarla es calcular el VSC sobre el piso del aula. La línea sin cielo es aquella a partir de la cual el VSC es

igual o menor al 0,2%. En la Figura 5.10 se presenta los resultados del cálculo del VSC sobre el piso del aula 515, a partir del cual se determina la línea sin cielo.

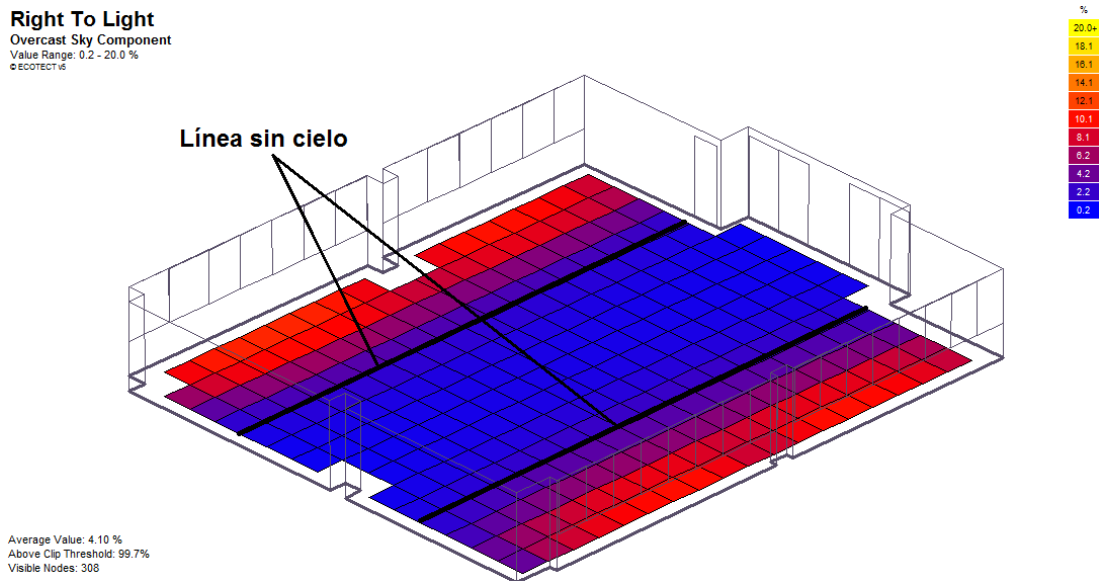


Figura 5.10. Línea sin cielo del aula 515.

Debido a que la línea sin cielo se usa para comparar su comportamiento bajo dos condiciones diferentes, y en este trabajo de grado no se propondrán cambios en el diseño del aula o se considerarán otras obstrucciones aledañas al EEEIE, el gráfico anterior sólo se muestra con el propósito de conocer la forma en que *Autodesk Ecotect Analysis* permite realizar este análisis.

5.5. DISTRIBUCIÓN DE GANANCIAS TERMICAS INDIVIDUALES

Una zona está conformada por diferentes elementos constitutivos como: muros, pisos, puertas, techos y ventanas. En cada zona se distinguen dos espacios uno interior y otro exterior, entre los cuales siempre existen intercambios de calor.

Para determinar los aportes de energía dentro de una zona es necesario definir la dirección del flujo, porque cuando los flujos se dirigen al exterior se generan pérdidas y cuando estos ingresan a la zona se obtienen ganancias de calor [60].

En la Figura 5.11 se esquematizan los diferentes tipos de ganancias y pérdidas presentes en una zona.

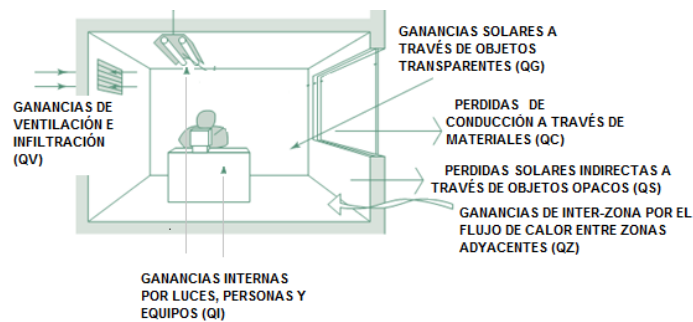


Figura 5.11. Ganancias y pérdidas térmicas consideradas dentro de una zona [1].

A continuación en la Tabla 5.1 se muestra una síntesis de los diferentes tipos de ganancias que se pueden calcular y simular a través del software *Autodesk Ecotect Analysis*.

GANANCIAS SOLARES	
GANANCIAS SOLARES DIRECTAS (Qg):	GANANCIA SOLAR INDIRECTA A TRAVÉS DE OBJETOS OPACOS (Qs):
Este tipo de ganancia ocurre cuando la componente de radiación solar directa, es decir aquella que viene del Sol sin cambiar de dirección, entra al interior por las ventanas, vacíos u otras superficies transparente/translúcida como vidrios.	Este tipo de ganancias se deben a la radiación solar que incide sobre la superficie externa de objetos opacos. La radiación solar incrementa la temperatura en la superficie externa y a su vez el flujo de calor por conducción [60].
GANANCIAS POR VENTILACIÓN (Qv)	
Este tipo de ganancias se deben a la transferencia de calor que ocurre con el movimiento de aire entre el interior y el exterior de una zona. La ventilación se puede dar de manera intencional, a través de huecos, ventanas y puertas, o bien en forma involuntaria, mediante la infiltración a través de los componentes constructivos. Se obtiene una ganancia por ventilación cuando la temperatura del aire exterior es mayor que la temperatura del aire interior, de lo contrario se asume como pérdidas de ventilación [60].	
GANANCIAS INTERNAS	
Las ganancias internas representan fuentes de calor al interior del edificio aportadas principalmente por personas al realizar sus actividades, luces, computadores y en general por todos los aparatos que consumen energía [60].	
GANANCIAS POR MATERIALES	
Se refieren a las ganancias debido a las diferencias de temperatura del aire entre el interior y el exterior de la zona. Estas ganancias dependen de dos factores, el primero de la conducción a través de los materiales de cada elemento constructivo, y el segundo de las ganancias solares indirectas que se estén radiando sobre la superficie [60].	
GANANCIAS INTERZONAS	
Es el resultado de los flujos de calor inducidos por las diferencias de temperatura entre las zonas. Este flujo se produce a través de las superficies de dos zonas son adyacentes entre sí. Considera las ganancias por conducción y por infiltración [60].	

Tabla 5.1. Tipos de ganancias simuladas en *Autodesk Ecotect Analysis*

El software *Autodesk Ecotect Analysis* permite calcular cada una de las ganancias mostradas en la Tabla 5.1. Al realizar la simulación se selecciona la

zona y el tipo de ganancia que se desea analizar, pudiendo considerarse más de una zona a la vez para obtener información general.

Los diferentes tipos de ganancias se calculan de manera individual, conservando el esquema de resultados mostrado en la Figura 5.12. Esta gráfica corresponde a la ganancia solar directa del aula 515, donde los ejes muestran horas del día verticalmente y mes del año horizontalmente. Los valores obtenidos corresponden a la distribución de ganancias y pérdidas promedio dados en Watt; en la parte derecha se observa una barra de colores donde se asocia cada color a su respectiva potencia; dependiendo del color se observa si existen ganancias o pérdidas.

Por ejemplo, para el mes de enero (ubicado en el eje horizontal), a las 16 horas (ubicado en el eje vertical) se obtiene una ganancia de 1,0 kW, este valor corresponde a la potencia promedio de todos los días del mes de enero en esa hora.

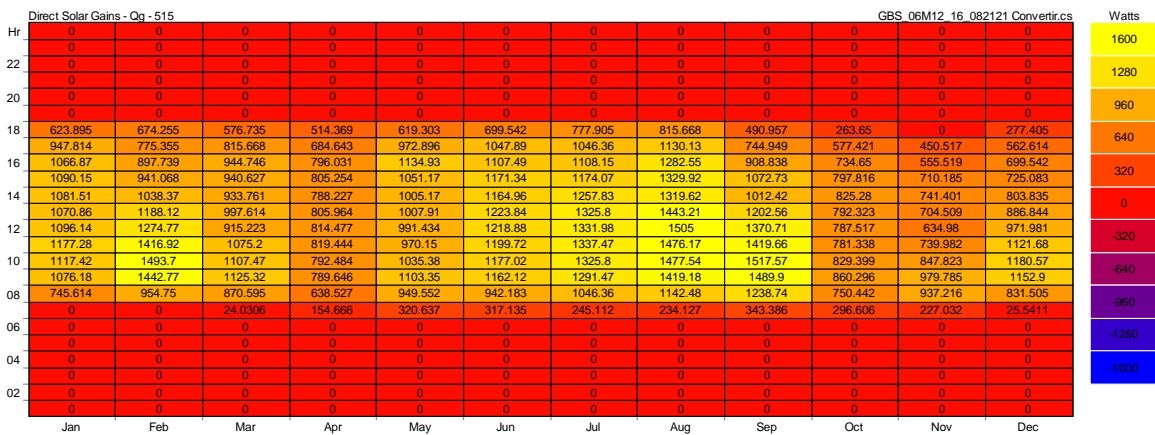


Figura 5.12. Gráfico de la distribución de la Ganancia solar directa (Qz) para el acceso principal

Este tipo de simulaciones permite analizar el comportamiento de los flujos de calor dentro de la zona, pudiendo identificar las fuentes predominantes de pérdidas y ganancias, así como la hora del día en que tienen mayor incidencia. Esto sirve como base para tomar decisiones que conduzcan a la mejora en el diseño de nuevas construcciones y realizar modificaciones en edificaciones existentes.

Al Aula 515 del EEEIE se le realizaron todas las simulaciones de ganancias que ofrece *Autodesk Ecotect Analysis*, obteniendo un gráfico semejante a la Figura 5.12 por cada ganancia.

Para facilitar la interpretación de las simulaciones se calculó la potencia promedio a una determinada hora, considerando todos los meses del año; por ejemplo, se tomó la hora 18, se sumaron los aportes de potencia de esa hora para todos los meses y se promediaron estos valores. De esta manera se obtuvo una curva del comportamiento diario de cada ganancia.

En la Figura 5.13 se muestran dos gráficos en los que aparecen las curvas de comportamiento diario de las ganancias. El primero para las ganancias internas e inter-zonas, ya que éstas tienen valores de ganancias altos y se ajustan mejor a la escala; y el otro para las ganancias restantes.

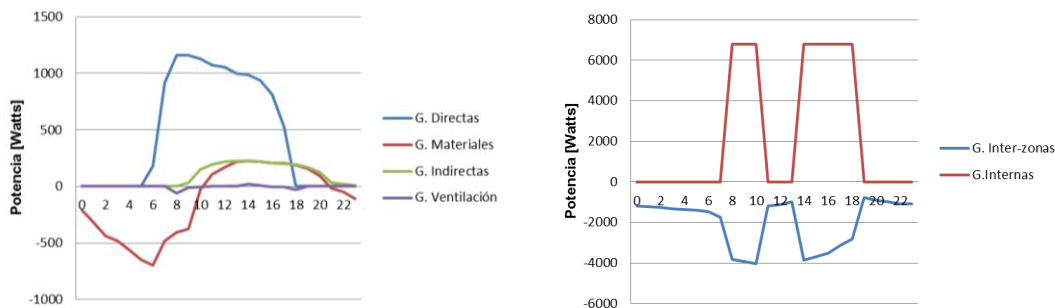


Figura 5.13. Ganancias y pérdidas del aula 515.

Con base en los resultados obtenidos se pueden hacer varias apreciaciones, entre las que se tienen:

- Las ganancias solares directas presentan valores muy bajos desde las 6 a.m., aumentando considerablemente hasta un valor pico de 1,2 kW sobre las 8 a.m. que se mantiene cuasi estable a lo largo de la tarde y decrece al llegar el atardecer sobre las 4 p.m. Este comportamiento se deben principalmente a la ubicación del aula, pues se encuentra en el último nivel del EEEIE y tiene dos fachadas sobre las que incide directamente la radiación solar a través de sus ventanales, una sentido Norte y otra sentido Sur/Interno.
- La zona presenta ganancias indirectas de 8 a.m. a 11 p.m. Esta ganancia se debe a que al comienzo del día la radiación solar incide sobre las paredes externas del EEEIE y luego de un tiempo empieza el proceso de conducción de calor a través del material, dependiendo de sus propiedades térmicas. Las ganancias permanecen cuando el Sol se oculta porque los materiales

- constructivos tienen la capacidad de almacenar calor al interior de la zona. Esta ganancias presenta un valor cuasi estable de aproximadamente 300 W.
- Las ganancias de los materiales están relacionadas directamente con las ganancias indirectas, debido a las características de los materiales constructivos, ya que estos permiten la conducción de flujos al interior, otra observación importante es que se presentan pérdidas desde las 0 horas hasta las 10 a.m., registrando un valor máximo de 750 W, existiendo un intercambio entre los flujos de calor de mayor temperatura atrapados en el espacio interior, y el exterior que posee una menor temperatura, esto se debe específicamente a la constante de retraso térmico o *thermal lag* diferente para cada material y depende de las propiedades intrínsecas del mismo (admitancia, Transmitancia, reflectividad, etc.) y de su grosor.
 - Las ganancias por ventilación presentan un comportamiento estable con valores prácticamente insignificantes comparados con las demás ganancias. Este comportamiento indica que no existen infiltraciones en el espacio interior que permitan aportar ganancias ni generar pérdidas considerables.
 - Las ganancias internas son las mayores de la zona alcanzando valores de más de 6 kW. Presentan el mismo comportamiento que los horarios de ocupación suministrados a *Autodesk Ecotect Analysis*, pues se presentan únicamente cuando hay personas generando calor o usando equipos. Esta ganancia permite evaluar los aportes de ganancias relacionados con los elementos internos como computadores, luminarias y personas al interior de la zona.
 - El aula 515 almacena gran cantidad de potencia debida a las ganancias internas que se intercambia con las zonas adyacentes, generando pérdidas inter-zonas con valores máximos de 4 kW y comportamiento inverso a las ganancias internas.

5.6. EXPOSICIÓN SOLAR

Los análisis de exposición solar (*Solar Exposure*), se refieren a las simulaciones realizadas para obtener información acerca de la radiación solar incidente, en una o más superficies planas cerradas dentro del modelo. Esta información es importante para el diseño solar pasivo, la estimación de la luz natural, el análisis cuantitativo de los derechos de acceso solar y la colocación eficaz de paneles fotovoltaicos [7].

El desarrollo de las simulaciones depende del periodo de radiación solar que se desee analizar, clasificándose en simulación de radiación solar diaria, simulación de radiación promedio y total mensual. Para efectuar los cálculos *Autodesk Ecotect Analysis* se basa en datos tomados directamente del archivo del clima.

5.6.1.Exposición solar día

Para llevar a cabo las simulaciones de exposición solar día se debe contar con el archivo del clima del lugar y con el modelo BIM del espacio interior, de manera que se permita la selección de los muros de manera individual junto con sus elementos constitutivos como puertas y ventanas, así como de su superficie superior correspondiente a techos o cubiertas.

Una vez ejecutada la simulación se obtiene la grafica mostrada en la Figura 5.14, que corresponde a la exposición solar día sobre la pared Sur-interna del Aula 515 en el 1 de diciembre.

En el eje horizontal aparecen las horas del día, y en el eje vertical se representan dos variables. En la parte derecha el porcentaje correspondiente únicamente al cálculo de sombras y en la parte izquierda la escala de la radiación solar dada en $[W/m^2]$.

La radiación solar se grafica descompuesta en radiación transmitida, absorbida, reflejada, incidente, directa y difusa, usando un color diferente para cada una de ellas, tal como se muestra en la Figura 5.14. La definición de cada una de las

componentes de radiación solar y los métodos de cálculo utilizados por *Autodesk Ecotect Analysis*, se encuentran en el ANEXO O.

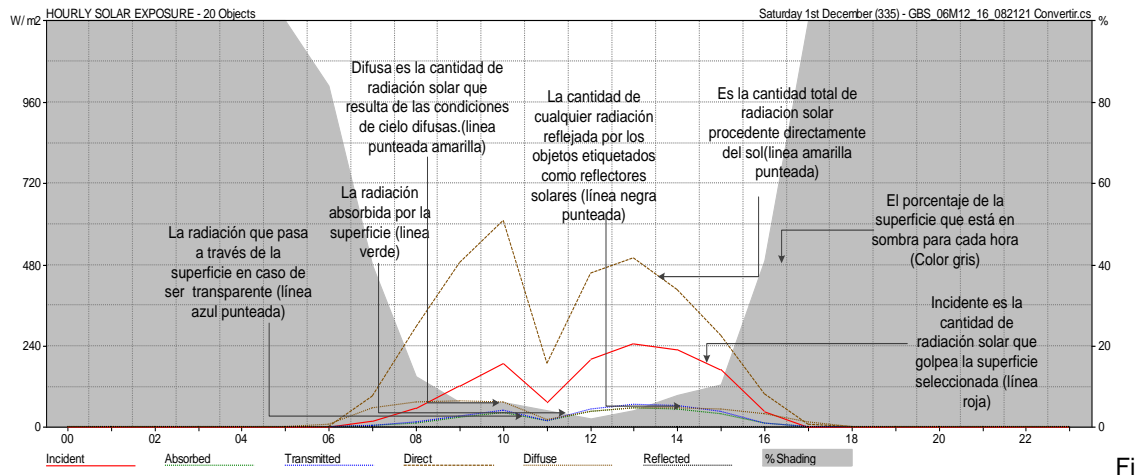


Figura 5.14. Análisis de exposición solar día de la fachada Sur-Interna Aula 515.

En la Figura 5.14 se puede apreciar que la radiación directa recibida por la pared Sur del Aula 515, mostrada con la línea amarilla punteada, presenta un valor máximo sobre las 10 a.m. de $600 W/m^2$, este valor es bajo teniendo en cuenta que en un día con poca nubosidad, el sol puede alcanzar valores cercanos de $1\ 000$ o $1\ 200 W/m^2$, sin embargo, no se pueden sacar conclusiones ya que se tendría que revisar el comportamiento de la radiación directa en los otros días del año.

También se puede observar que el comportamiento de la radiación solar incidente es similar al de la radiación solar directa, presentando un pico sobre las 10 a.m. y disminuyendo notablemente sobre las 11 a.m. Los valores de radiación incidente son mucho más altos en las horas de la tarde, alcanzando los $240 W/m^2$.

En general, se aprecia que las componentes de radiación absorbida, transmitida, difusa y reflejada presentan un comportamiento cuasi estable. Esta característica sería muy favorable si se deseara diseñar un sistema de iluminación natural.

5.7. FACTOR DE LUZ DÍA (*DAYLIGHT FACTOR*)

La iluminación natural es una consideración importante en el diseño de edificios energéticamente eficientes. Mediante el uso de la luz día para iluminar el interior de un edificio, se puede reducir la necesidad de iluminación artificial o eléctrica, que a su vez reduce el consumo de energía en el edificio durante las horas del día [12].

En los edificios comerciales, la iluminación representa hasta el 21% del consumo total de energía. Un sistema de iluminación natural bien diseñado puede reducir la energía requerida de iluminación hasta en un 80%. Además, la luz natural es muy eficiente en términos de cantidad de iluminancia, pues genera una cantidad de calor menor que los sistemas de iluminación artificial para satisfacer determinado nivel de iluminación (denominada eficacia luminosa). Esto significa que el mayor aprovechamiento de la iluminación natural también puede reducir las cargas de enfriamiento dentro del edificio durante los días calurosos [12].

El factor de luz día, como se aprecia en la Figura 5.15, 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 [12].

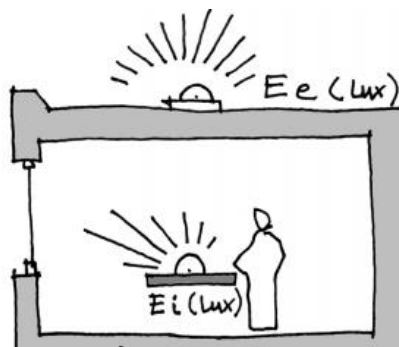


Figura 5.15. Cálculo del factor de luz día [13].

Una vez que tanto el factor de luz natural y el cielo de diseño se conocen, simplemente multiplicando los dos juntos se obtiene el nivel de iluminancia (lux) debido al cambio en el punto [63].

$$L_{point} = \frac{DF_{point}}{100} \times L_{DesignSky} \quad (Ec. 5.1)$$

Dicho valor es una constante característica de los huecos, geometría y reflectancia de las superficies del espacio [13]. Con el programa *Design Sky Illuminance Calculator*, incluido en el paquete de *Trainings* del software, se calculó que en Bucaramanga (Lat = 07°08'N), el nivel de iluminación horizontal exterior es del orden de 9 800 lux (Figura 5.16) y se estima que puede superar este valor al mediodía, con un cielo despejado.

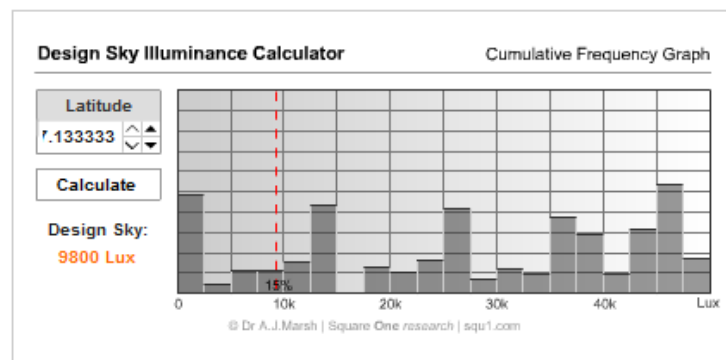


Figura 5.16. Cálculo del diseño de cielo (En lux).

Una vez calculado el valor de diseño de cielo (*Design Sky*), se debe establecer el modelo de distribución de luminancia o tipo de cielo (los diferentes tipos de cielo se describen con mayor detalle en el ANEXO P), teniendo en cuenta las condiciones geográficas del lugar.

El siguiente paso consiste en 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 [12].

Los elementos arquitectónicos como ventanas, claraboyas, estantes luz e incluso la reflectividad de las superficies internas son factores importantes en la iluminación natural del diseño. Los elementos externos, como se observa en la Figura 5.17 tales como los edificios cercanos, la estructura y los dispositivos de sombreado también afectarán a la disponibilidad de luz natural [12].

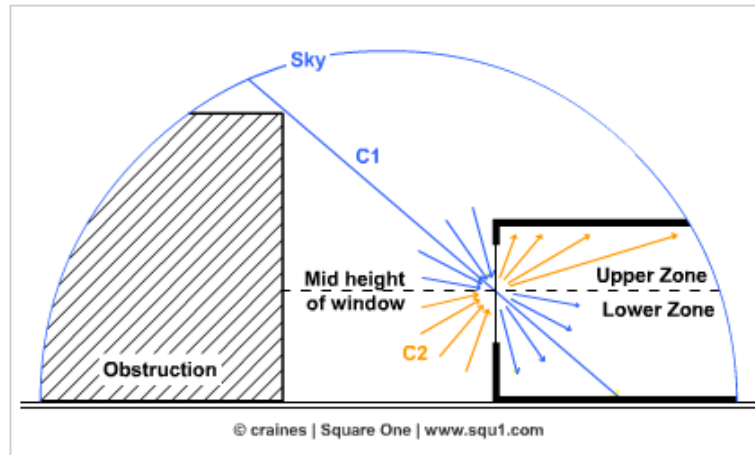


Figura 5.17. Factores que afectan a la penetración de la luz del día en un espacio [12].

Como las condiciones de iluminación natural están continuamente cambiando y los niveles de iluminación absolutos del cielo puede ser difíciles de calcular; es más útil diseñar basándose en la cantidad relativa de luz que entra en un espacio. De esta manera los niveles internos de luz pueden ser expresados como un porcentaje de los niveles externos. Así, aunque el cielo esté momentáneamente más oscuro o más brillante, el porcentaje seguirá siendo el mismo. Esto significa que dicho valor porcentual es una propiedad del edificio, proporcionando una medida objetiva para la comparación de opciones alternativas de diseño y permitiendo la comparación directa con otros edificios. Este valor se conoce como el factor de luz natural [63].

5.7.1 Los sensores fotoeléctricos

En *Autodesk Ecotect Analysis* es posible considerar dos escenarios de funcionamiento del sistema de iluminación vinculados a la conmutación fotoeléctrica del modelo, y por ende a la eficacia potencial de la luz diurna. Esto se basa en el trabajo de investigación llevado a cabo por el *Building Research Establishment* sobre el control automático de la iluminación por sensores fotoeléctricos de los niveles de luz del día. Se obtuvieron dos modelos que relacionan los posibles ahorros de energía anuales de iluminación con el *daylight factor* promedio de cada zona. El primero, asume la capacidad de atenuar la

iluminación, basado en el nivel de iluminación natural, mientras que el otro simplemente se conecta o desconecta según sea apropiado.

El objetivo de este análisis es dar una indicación de ahorros probables. Obviamente, el tipo exacto de sistema de control instalado y su configuración determinará en última instancia el ahorro; sin embargo, este cálculo dirá si vale la pena seguir tal solución de diseño.

- **Encendido / apagado (*Switching*)**

Los controles se establecen para apagar las luces cuando los niveles de luz son detectados por encima del nivel de iluminación de diseño de la zona. Si los niveles de luz caen por debajo de este umbral, las luces simplemente se vuelven a encender. Se asumirá que el control de iluminación del EEEIE es Encendido / apagado, ya que este modelo tiene un comportamiento similar al control manual.

En la Figura 5.18 se muestra la gráfica para el aula de estudio seleccionada, con este tipo de control. Es importante resaltar que ésta se encuentra en la fachada Norte, no posee cortasoles y está ubicada en el último piso de la edificación.

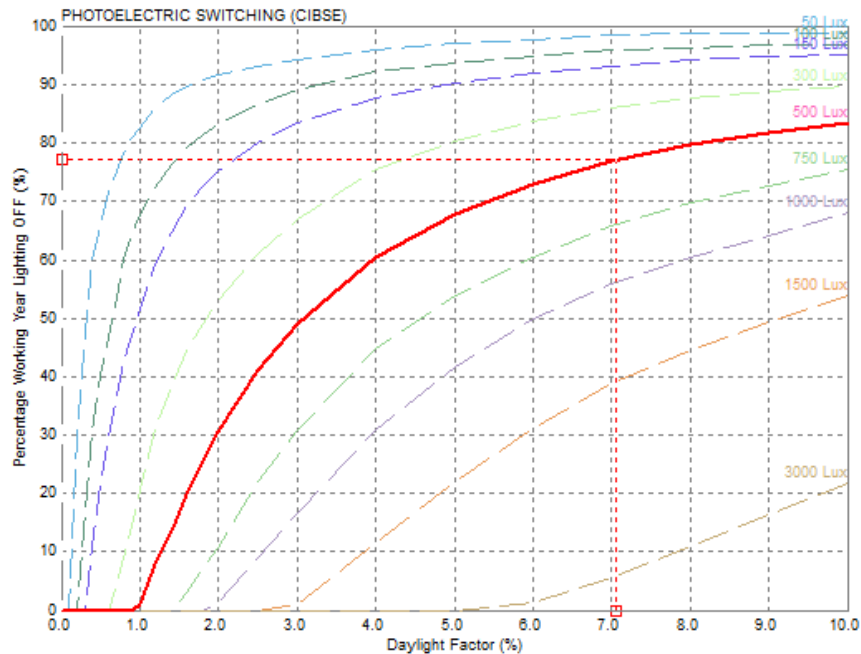


Figura 5.18. Simulación del porcentaje de tiempo al año que el espacio puede trabajar con las luces apagadas, para el control Encendido/Apagado.

Como se ha dicho en capítulos anteriores, el nivel de iluminación requerido se ha definido dentro del BIM como 500 lux, de acuerdo al Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP).

De la simulación, se obtienen el porcentaje de tiempo durante el año en el cual es posible operar solamente con luz natural, este valor corresponde al 77%, al igual que el valor del *Daylight Factor* para el nivel de iluminación establecido (en el caso del Aula 515, DF=7,05).

- **Interruptor de atenuación (*Dimming*)**

El sistema de control atenúa las luces de forma continua, complementando artificialmente los niveles de luz para asegurar el nivel de diseño de iluminancia se mantiene en todo momento. La Figura 5.19 se muestra el mismo análisis para el aula 515, pero empleando interruptores de atenuación.

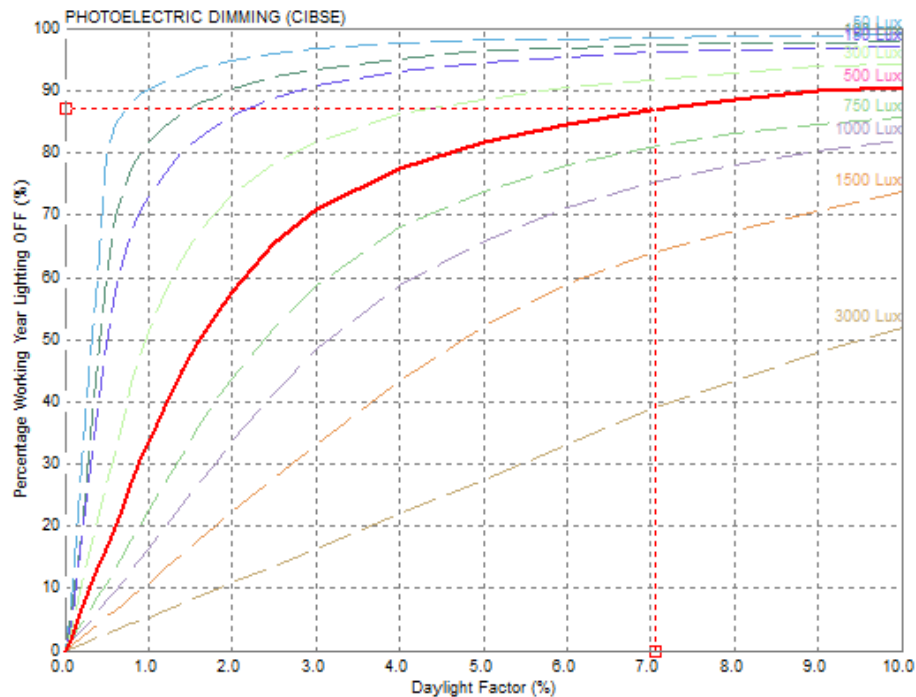


Figura 5.19. Simulación del porcentaje de tiempo al año que el espacio puede trabajar con las luces apagadas, para el control por interruptor de atenuación

Como se puede observar de la Figura 5.19 el valor del factor luz día no se afecta por el tipo de control empleado (de nuevo, $DF=7,05$), pero el porcentaje de tiempo durante el año en el cual es posible operar solamente con luz natural sí varía dependiendo del control de iluminación empleado tomando un valor de 87%.

Finalmente, realizando una comparación entre los valores obtenidos para cada simulación, se establece el ahorro energético que puede representar el control por interruptor de atenuación (el más eficiente) con respecto al control Encendido / apagado, como la diferencia porcentual del tiempo al año en que el aula puede funcionar con las luces apagadas para los dos tipos de control (tomando los datos de las Figura 5.18 y Figura 5.19 respectivamente).

$$\text{Ahorro} = 87\% - 77\% = 10\%$$

Para el aula 515, se tendrían ahorros hasta del 10% en iluminación cambiando el tipo de control de encendido / apagado a uno por interruptor de atenuación.

Referencias Bibliográficas

- [1] Aidyn Hezer, Nevin. The effect of construction materials on thermal comfort in residential buildings. Disponible en: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/4/1104645/index.pdf>. Fecha de consulta: Mayo 11 de 2012..
- [2] Marsh, Andrew; Autodesk Inc. Help Ecotect 2011. 2010.
- [3] «Cómo ahorrar energía en el uso del aire acondicionado,» [En línea]. Available: <http://hogar.comohacerpara.com/n116/como-ahorrar-energia-en-el-uso-del-aire-acondicionado.html>. [Último acceso: 25 Agosto 2012].
- [4] « ¿A qué temperatura se debe poner el aire acondicionado?,» [En línea]. Available: <http://aireacondicionadomadrid.over-blog.es/article-el-consumo-del-aire-acondicionado-85097392.html>. [Último acceso: 25 Agosto 2012].
- [5] C. Pérez, H. Campbell, A. Borroto y J. Monteagudo, «Horas-grado, un criterio realista para caracterizar climatológicamente una región con propósitos de uso eficiente y ahorro de energía eléctrica,» [En línea]. Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar07/HTML/articulo04.htm>. [Último acceso: 17 Mayo 2012].
- [6] ASHRAE. ASHRAE Fundamentals: Thermal comfort. 2009.
- [7] Autodesk, Inc. Help Ecotect 2011. 2010.
- [8] CIBSE, CIBSE Guide A: Environmental design, London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, Séptima edición. 2006.

- [9] Autodesk Inc., Autodesk Ecotect - Solar radiation training package, 2008.
- [10] M. Wilson, «Daylight, sunlight and planing in the UK,» [En línea]. Available: http://public.ises.org/PREA2007/3_Presentations/4_Technologies_Examples/5_Wilson_Daylight_UK.pdf. [Último acceso: 5 Agosto 2012].
- [11] Autodesk, Inc, Autodesk Ecotect Analysis: Questions and Answers, 2009.
- [12] Autodesk, Inc., Autodesk Ecotect - Daylight Factor Training Package (complemento para Autodesk Ecotect Analysis), [En línea] Disponible en: <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/index?siteID=123112&id=13734593>, 2008.
- [13] M. M. Monroy, Manual de Iluminación. Manuales de Diseño ICARO, Las Palmas de Gran Canaria: Departamento de Construcción Arquitectónica. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2006.
- [14] Autodesk, Inc, Autodesk Ecotect Analysis: Questions and Answers, [En línea] Disponible en: http://www.sistemaconsultores.com/software/autodesk/ecoa/ecotectanalysis10_faq_customer_sc.pdf, 2009.
- [15] Wikipedia: La enciclopedia libre, «Heating ventilation and air conditioning,» 6 Junio 2012. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Heating,_Ventilating_and_Air_Conditioning. [Último acceso: Agosto 5 2012].

6. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS EN ESPACIOS INTERIORES DEL EEEIE

En este capítulo se presenta el proceso de selección de espacios críticos del EEEIE, teniendo en cuenta el comportamiento de las variables en cada zona, de acuerdo a las simulaciones del comportamiento térmico, de radiación y de iluminación natural realizadas al modelo BIM aún sin calibrar en *Autodesk Ecotect Analysis*.

El procedimiento empieza, con el listado de todos los espacios que conforman el edificio, una vez se han definido todas las zonas se realiza una pre-selección de los espacios críticos analizando las variables de forma cualitativa y cuantitativa.

Dependiendo de la cantidad de espacios que resulten en la etapa de pre-selección, se deberá reducir el número de espacios críticos; para esto, se realizarán las simulaciones e interpretación de los análisis térmicos del EEEIE en cuanto a pérdidas y ganancias térmicas (por conducción, ventilación, iluminación, equipos, personas, flujo de calor entre zonas solares), confort térmico, temperatura interna y cargas espaciales. Luego se desarrollarán los análisis de iluminación natural para, finalmente, seleccionar los espacios interiores críticos que se tendrán en cuenta para la calibración del BIM.

De acuerdo a lo especificado en la metodología propuesta, el análisis preliminar del comportamiento de los espacios interiores del EEEIE tiene dos objetivos principales; el primer objetivo es utilizar la guía elaborada en el capítulo anterior, y el segundo es seleccionar los espacios interiores más críticos de acuerdo a su comportamiento para posteriormente calibrar el BIM del EEEIE a partir de mediciones y simulaciones realizadas en ellos.

6.1 PRE-SELECCIÓN DE LOS ESPACIOS INTERIORES CRÍTICOS DEL EEEIE

El EEEIE es una edificación de seis (6) pisos, cada nivel cuenta con una distribución de espacios interiores, mostrados en la Tabla 6.1

Piso	Descripción
0	Destinado a bodegas, un laboratorio, un baño, la planta eléctrica y la subestación eléctrica.
1	En este nivel se encuentra el Auditorio Guillermo Camacho Caro, el centro de estudios, y las aulas de mayor área como lo son el Salón Fundadores y Salón Excelencia, además de una sala de computo y los módulos de los profesores de cátedra.
2	Se encuentra el acceso principal al edificio, un total de 5 aulas de clases, 22 oficinas para docentes, 4 salas de reuniones, 1 bodega y una cabina para el sonido.
3	Este piso es adecuado netamente para la docencia y cuenta con 12 aulas de clases.
4	En este nivel se encuentran 12 oficinas administrativas, incluyendo la del director de escuela, coordinador, secretarías y auxiliares; 2 aulas con fines docentes, 1 aula para la Alianza Industrial, 7 oficinas del área de investigación, 5 aulas destinadas para posgrados y maestría, y 2 aulas de archivo.
5	Cuenta con 9 aulas de clase, una cafetería y el Auditorio Enrique D.
NOTA: En todos los pisos se tienen baños para hombres y mujeres, cuartos para almacenar materiales de aseo, y zonas comunes como pasillos, escaleras y áreas de descanso.	

Tabla 6.1. Descripción general de cada piso del EEEIE.

Debido al área y número de aulas que conforman la edificación, realizar el análisis de cada espacio del edificio es una tarea extenuante, que puede acotarse haciendo una pre-selección de zonas representativas teniendo en cuenta sus características. Para ello, se establecieron ocho (8) criterios presentados en la Tabla 6.2: fachada, ventanas, tiempo de uso, ocupación, potencia de lámparas por unidad de área, equipos, área y cortasoles. Estos se usan para predecir las condiciones de temperatura e iluminación más drásticas; y a su vez, comparar los efectos de la ubicación y características de las aulas.

Criterio	Descripción	Selección de espacios interiores
Fachada	Es el parámetro exterior que define directamente el flujo y cantidad de energía (luz y calor) intercambiado entre el exterior e interior del edificio.	Pertenecientes a cada una de las fachadas
Ventanas	Son elementos que sirven para el intercambio de aire, luz y calor entre el exterior e interior; su efecto depende principalmente del tamaño y ubicación.	Con ventanas en diferentes fachadas.
Tiempo de uso	Establece el tiempo durante el cual habrá personas expuestas a las condiciones de los espacios interiores y aportando calor.	Con mayor tiempo de uso.
Ocupación	Establece el número máximo de personas que pueden estar en el interior de una zona, generando ganancias de calor que dependen de la actividad que se realice.	De máxima ocupación.
Potencia de lámparas	Una relación entre la potencia de las luminarias y el área de las aulas. Debido a que no se realizan	Con mayor potencia por unidad de área.

por unidad de área	simulaciones de iluminación artificial (por limitaciones del programa), el efecto de las lámparas instaladas en las zonas es un aporte a las ganancias internas de calor.	
Equipos	Elementos que influyen directamente en el modelamiento térmico de la edificación por su aporte de calor. Se consideran por ejemplo computadores, proyectores y sistemas de sonido.	Con mayor número de equipos de cómputo por su aporte a las ganancias internas de calor
Área	Es la medida que determina el tamaño del espacio interno y el volumen de aire encerrado.	De mayor tamaño, y aulas de dimensiones similares pero características diferentes
Cortasoles	Es un producto diseñado para fachadas de edificios, como protector de la incidencia de los rayos solares y del ruido externo	Que en sus ventanas tengan cortasoles y otras similares que no los tengan para realizar comparaciones.

Tabla 6.2. Criterios considerados para elegir los salones en los que se hicieron las simulaciones.

En el ANEXO Q se presenta la descripción de los espacios interiores del EEEIE de acuerdo a los criterios especificados anteriormente. Teniendo en cuenta el listado se pre-seleccionan los espacios que, de acuerdo a sus características, potencialmente presentan las condiciones más críticas. La Tabla 6.3 resume las razones por las que se eligió cada una de las zonas.

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.
Aula 103 – Salón Excelencia	Aula de gran ocupación y de uso considerable en horas a la semana.
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 304	El salón de mayor tiempo de uso a la semana
Aula 307	Único salón con fachada totalmente al occidente y que presenta ventanas hacia la misma, de tamaño medio y una ocupación de horas a la semana importante.
Aula 515 – Auditorio Enrique Daccarett	Aula de mayor área de todo el edificio.

Tabla 6.3. Salones pre-seleccionados para realizar las simulaciones en *Autodesk Ecotect Analysis*, con sus respectivos criterios de selección.

A continuación se ejecutan simulaciones de *Autodesk Ecotect Analysis* que permiten conocer el comportamiento térmico de los espacios interiores pre-seleccionados. Los resultados se tienen en cuenta para seleccionar los espacios críticos sugeridos con el fin de continuar con el desarrollo de la metodología propuesta.

6.2. SIMULACIONES REALIZADAS A LOS ESPACIOS INTERIORES PRESELECCIONADOS

Una vez definidos los espacios interiores, éstos se evaluarán de forma cuantitativa, basándose en las simulaciones que ofrece *Autodesk Ecotect Analysis*. A continuación se muestran los resultados de las simulaciones y las razones para denominarlos, como espacios interiores críticos; cabe destacar que dichos espacios serán considerados en un trabajo de grado posterior, donde se realizará su respectiva calibración.

6.2.1. Confort térmico

Se decidió simular el confort térmico considerando los grados hora de disconfort, que consiste en ponderar cada hora de disconfort de acuerdo al número de grados fuera de la franja de confort; pues son una medida indirecta de los requerimientos de enfriamiento y calefacción de la zona [1].

En el ANEXO R se presentan los gráficos obtenidos al ejecutar las simulaciones de grados hora de disconfort en las siete (7) zonas pre-seleccionadas, teniendo en cuenta una franja de confort definida a partir del modelo adaptativo con ventilación natural. En la Figura 6.1 se resumen los resultados presentándolos como grados hora de disconfort acumulados en un año para cada zona.

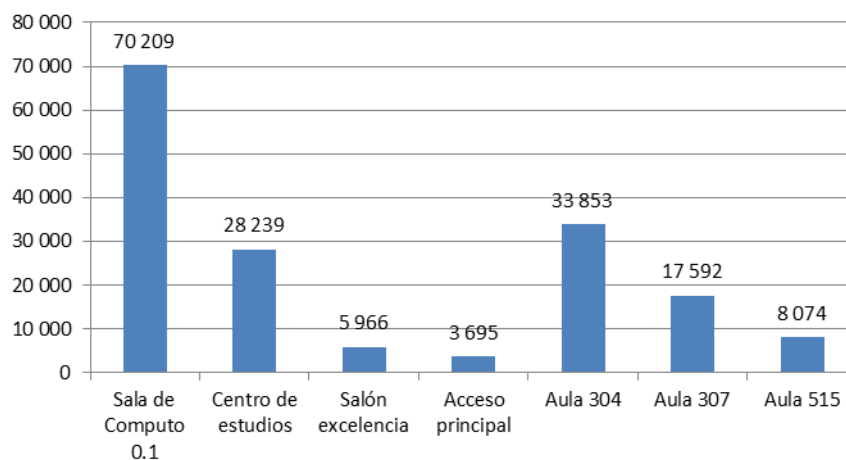


Figura 6.1. Grados-hora acumulados durante un año en aulas preseleccionadas.

En la Tabla 6.4 se presenta un resumen de las características de las zonas preseleccionadas y observaciones de disconfort térmico de cada una, realizadas a partir de las graficas de grados hora generadas por *Autodesk Ecotect Analysis* que aparecen en el ANEXO R.

Zona	Observaciones	Zona	Observaciones
Sala de computo	<ul style="list-style-type: none"> - Meses de mayor disconfort: mayo, agosto y octubre. - Meses de menor disconfort: febrero y septiembre. <p>Es la zona con más grados-hora de disconfort anuales. De acuerdo a las simulaciones de ganancias y pérdidas, esto se debe principalmente a las fuentes de ganancias internas, que están directamente relacionadas con los equipos de cómputo y las personas en su interior.</p>	Aula 304	<ul style="list-style-type: none"> - Meses de mayor disconfort: mayo y agosto. - Meses de menor disconfort: febrero y septiembre. <p>A pesar de que es un aula relativamente pequeña y con un número de ocupantes bajo, su tiempo de uso es el mayor y la ganancia de calor por iluminación (Potencia/área) es alta respecto a la de las demás aulas. Debido a estos dos últimos factores esta aula es el segundo espacio con más grados-hora de disconfort anuales.</p>
Centro de estudios	<ul style="list-style-type: none"> - Meses de mayor disconfort: enero, mayo, agosto y octubre. - Meses de menor disconfort: febrero y septiembre. <p>Uno de las tres (3) aulas con más grados hora anuales. De acuerdo a los análisis previos, este comportamiento se debe principalmente al número de personas y equipos, como computadores portátiles, que contribuyen a las ganancias internas de la zona.</p>	Aula 307	<ul style="list-style-type: none"> - Meses de mayor disconfort: julio y agosto. - Meses de menor disconfort: enero y noviembre. <p>El número de grados-hora de disconfort de esta aula es relativamente bajo.</p>
Salón Excelencia	<ul style="list-style-type: none"> - Meses de mayor disconfort: mayo y agosto. - Meses de menor disconfort: enero, abril y noviembre. <p>El número de grados hora anuales es bajo. Esto se debe en gran parte a que el tiempo de uso del aula es relativamente bajo, comparado con otras zonas analizadas. A pesar de que la ocupación de esta aula es considerable, al tener en cuenta el área del salón, su densidad es baja. Además no se tienen equipos de cómputo, que son los que más</p>	Aula 515	<ul style="list-style-type: none"> - Meses de mayor disconfort: agosto. - Meses de menor disconfort: septiembre y noviembre. <p>Aula con mayor área, que presenta un número de grados hora anuales relativamente bajos, teniendo en cuenta su tamaño y ocupación. Este comportamiento puede deberse a que las cargas internas por equipos e iluminación son muy bajas para su área.</p>

	contribuyen a las ganancias internas.		
Acceso Principal	<ul style="list-style-type: none"> - Meses de mayor discomfort: julio y agosto. - Meses de menor discomfort: enero, abril y noviembre. <p>Es el espacio analizado con menos grados hora. Esto se debe a que a pesar de que continuamente hay personas, éstas se mueven y no se quedan contribuyendo permanentemente a las ganancias de calor de la zona.</p>		

Tabla 6.4. Resumen de las características de las zonas preseleccionadas y observaciones relacionadas con el confort térmico.

A partir de la Tabla 6.4 se puede decir que las aulas que presentan más grados-hora acumulados son las que tienen mayor concentración de fuentes de ganancias internas. Teniendo en cuenta las características particulares de la Sala de cómputo y el Centro de Estudios, las ganancias se deben a la cantidad de computadores y en menor proporción al número de personas en su interior.

En estos casos el mayor aporte a los grados-hora se debe a las altas temperaturas que se tienen como resultado de las ganancias internas generadas por los computadores y ocupación, y no simplemente por el número de horas en que se encuentran fuera de la zona de discomfort. Mientras que en el caso del Aula 304, que fue elegida por tener más horas de uso semanales, la mayor parte de grados-hora de discomfort debe ser producto del número de horas en que se encuentra en funcionamiento, que aumenta la probabilidad de que funcione en los momentos del día en que las condiciones son menos favorables.

Esto indica que el aumento en la temperatura interna de la zona está relacionado principalmente con las ganancias de calor aportadas por equipos y personas.

6.2.2 Simulaciones de temperatura interna

Los espacios preseleccionados se definen sin carga HVAC para realizar las simulaciones de temperatura interna, pues cuando si se tienen en cuenta la zona siempre se encuentra en la banda de confort. En esta simulación la franja de confort sólo se puede definir con una franja fija, por lo que se tomó un intervalo conservador de 18°C - 26°C [1].

En la Figura 6.2 se muestra el porcentaje de horas al año durante las cuales las zonas preseleccionadas están en confort, sin ningún sistema de refrigeración artificial. Los valores han sido extraídos de las simulaciones de *Autodesk Ecotect Analysis* presentadas en el ANEXO R.

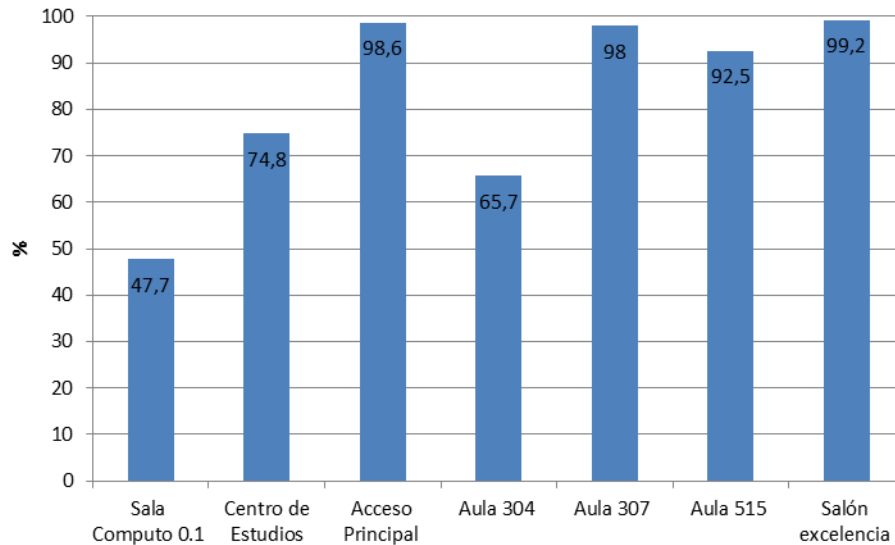


Figura 0.2. Porcentaje de horas en confort de las zonas preseleccionadas.

Como se puede observar, los resultados son consecuentes con los arrojados en las simulaciones de confort térmico, pues una vez más, la Sala de Cómputo, el Centro de Estudios y el Aula 304 son las zonas críticas, al presentar la menor cantidad de horas de confort anuales; donde claramente es necesario un sistema integrado de ventilación artificial para compensar las altas temperaturas que se presentan debido a las ganancias internas.

Por otra parte, también es posible deducir que el resto de aulas están dentro del rango de confort la mayor parte del tiempo; y por lo tanto, los requerimientos de un sistema de aire acondicionado son mínimos.

6.2.3. Cargas espaciales

El gráfico de cargas espaciales mensuales muestra el total de cargas de calefacción (rojo) y enfriamiento (azul), en Wh (Watt-hora), requeridas para los espacios interiores pre-seleccionados.

La Figura 6.3 muestra la carga espacial necesaria para mantener el confort en las zonas preseleccionadas del EEEIE durante cada mes del año con el sistema de ventilación *Full Air Conditioning*²¹.

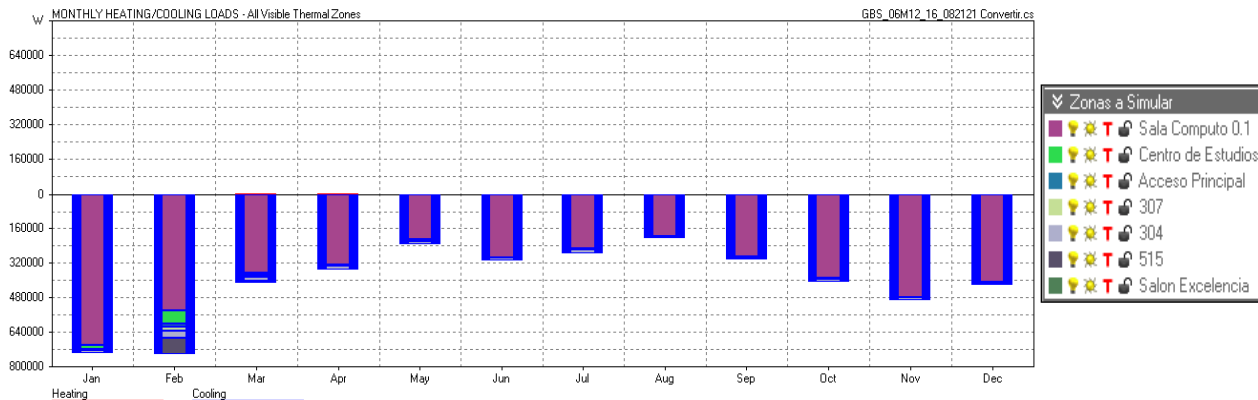


Figura 6.3. Cargas de Refrigeración mensual mostrando la contribución parcial de cada zona, modo *Full Air Conditioning*.

En la Figura 6.3. se puede apreciar que la mayoría de las zonas analizadas del EEEIE presentan un comportamiento similar al analizado en las simulaciones de confort, siendo las zonas con mayores requerimientos de enfriamiento las que tienen gran cantidad de cargas internas.

El aula 515 es la única que difiere del comportamiento descrito previamente, pues en los análisis de confort era una de las que menos grados hora de disconfort presentaba, y ahora es la segunda que más requiere cargas de enfriamiento.

Esto puede explicarse porque las cargas de enfriamiento no se relacionan únicamente con la cantidad de calor que se debe disipar, sino también con el volumen de aire interno, y esta aula es la más grande.

Por otro lado, la Figura 6.4 muestra la carga espacial necesaria para mantener el confort durante cada mes del año, con el sistema de ventilación *Mixed-Mode*

²¹ El sistema de calefacción y refrigeración funciona cuando se requiera mantener la temperatura del aire de la zona entre los valores definidos del termostato durante el periodo operacional. Las ventanas nunca se abren, por lo que la única ventilación o infiltración es la que se define en la tasa de renovaciones de aire de la zona.

*System*²², que aprovecha al máximo la ventilación natural y sólo hace uso de los sistemas de ventilación artificial en las horas de mayor ganancias internas.

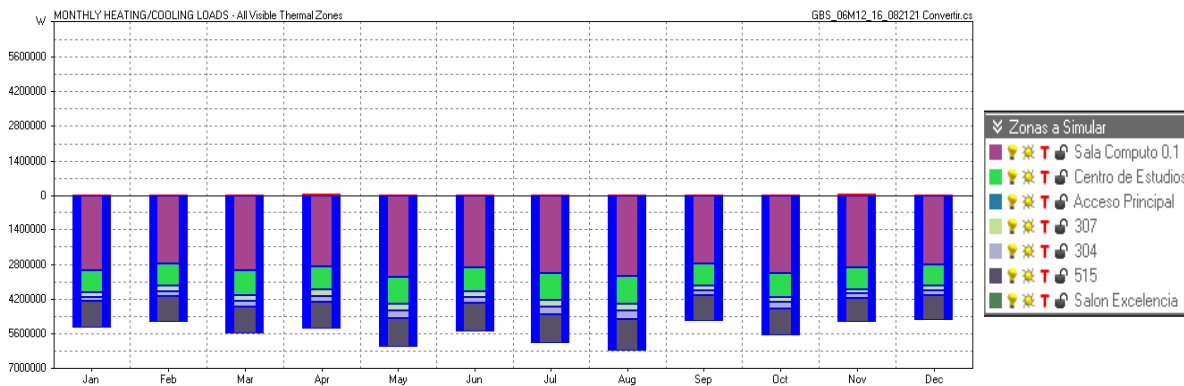


Figura 6.4. Cargas de refrigeración mensual mostrando la contribución parcial de cada zona, *Mixed-Mode System*.

En el caso del sistema de enfriamiento de modo combinado (*Mixed-Mode System*), se puede ver que la distribución de las cargas de enfriamiento varía respecto al caso anterior, pues la mayor parte de los requerimientos de refrigeración se deben a la sala de cómputo. Esto implica que en las demás zonas las condiciones ambientales externas, principalmente la ventilación, ayudan a mantener el confort.

Al comparar entre ambos sistemas, se observa que al usar del sistema de modo combinado se requiere sólo el 7,4% de la carga necesaria para mantener el confort con el sistema de aire acondicionado. De manera que resulta energéticamente mejor, el uso de un sistema de ventilación mixta, que aprovecha las condiciones climáticas.

6.2.4. Derecho a la luz

El derecho a la luz (*Right to light*) se establece en la ley británica como la forma de garantizar que edificaciones nuevas, construidas cerca a una existente por más

²² Se combina el sistema de aire acondicionado y la ventilación natural, de manera que el sistema HVAC se apaga cuando las condiciones externas se encuentran dentro de las condiciones definidas en el termostato. *Autodesk Ecotect Analysis* asume que el sistema funciona y provee ventilación mecánica o las ventanas están abiertas, las dos situaciones no ocurren a la vez. Además, no se considera la energía usada en los conductos de aire cuando se calculan las cargas de calefacción y refrigeración, ya que se dan como cargas espaciales y no cargas de planta.

de veinte (20) años, no limiten la luz natural que entra a través de las ventanas a niveles incómodos para sus ocupantes [1]. Para el desarrollo de este numeral, se considera la normativa británica como referencia para conocer el impacto producido por los elementos cercanos al EEEIE sobre el acceso a la luz natural de la edificación, teniendo en cuenta que *Autodesk Ecotect Analysis* la toma como base para su simulación.

En el ANEXO Ñ se describe el procedimiento para el análisis del derecho a la luz natural a partir de *Autodesk Ecotect Analysis*.

Se consideran como objetos que pueden obstruir la luz natural, los árboles cercanos a la edificación, el Edificio de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones – E3T, la Casona la Perla. El Edificio del Instituto de Lenguas Idiomas, y el Edificio Mamitza Bayer (Diseño industrial). Estos objetos fueron incluidos en el BIM.

A continuación se presentan las simulaciones realizadas al EEEIE para conocer la forma en que los objetos adyacentes afectan su derecho a la luz.

- **Envolvente solar**

La envolvente de una edificación 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 [3].

En la Figura 6.5 se muestra la envolvente solar de cada fachada generada a partir de *Autodesk Ecotect Analysis*.



Norte

Sur

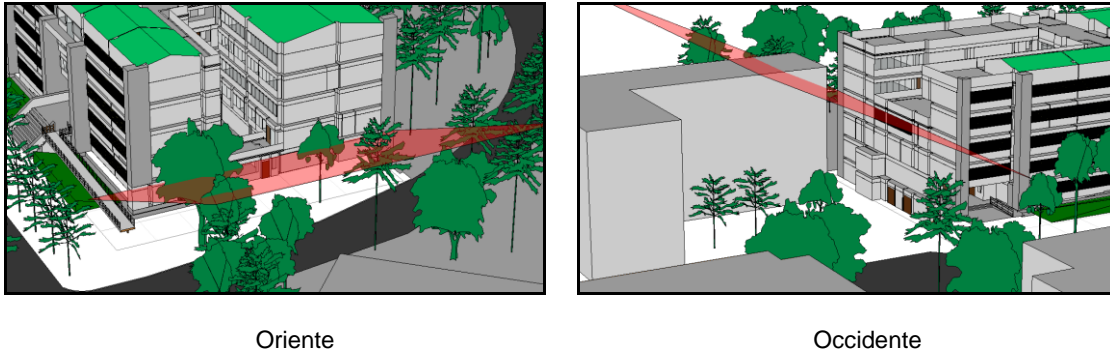


Figura 6.5. Envolvente solar del EEIE en cada una de sus fachadas.

Para trazar la envolvente solar se toma el piso más crítico de cada fachada, que es el primer piso en que se encuentran ventanas; por lo cual, en la fachada norte la envolvente se trazó a partir del marco superior de las ventanas del primer piso; en la fachada sur a partir del piso cero (en el que se encuentran los laboratorios); en la fachada oriente a partir del primer piso, donde se encuentra la cafetería Iraka, que es la única área que se vería directamente afectada por las obstrucciones; y, en la fachada occidente a partir del tercer piso, pues el aula 307 es la única que tiene ventanas sobre esta fachada.

A partir de la Figura 6.5 se puede ver que en las fachadas norte, sur y oriente, el derecho a la luz se ve afectado únicamente por el efecto de los árboles aledaños; mientras, la fachada occidente es afectada por el Edificio de la E3T. En la Tabla 6.5 se presenta el análisis de las obstrucciones de cada fachada del EEIE, teniendo en cuenta la envolvente trazada por *Autodesk Ecotect Analysis*.

Fachada	Obstrucciones	Observaciones
Norte	Árboles	<p>Es la fachada que presenta la mayor proporción de obstrucciones que sobresalen al plano de la envolvente solar, dado que los árboles más altos y cercanos al edificio se encuentran sobre esa zona. A pesar de ello, no se puede afirmar que sea la fachada crítica en cuanto al derecho a la luz, pues el efecto de los árboles como obstrucciones no es tan drástico como el que causarían los edificios, porque no bloquean completamente la luz solar, sino que permiten que parte de ella se filtre.</p> <p>Se debe realizar el análisis de componentes verticales del cielo para revisar si en realidad se presenta una violación al derecho a la luz en esta fachada.</p>

Sur	Árboles	<p>Los árboles ubicados frente a la cara principal del EEEIE constituyen las obstrucciones de esta fachada. Su efecto limitando el paso de la luz solar es poco, debido a la baja proporción de hojas que superan el plano de la envolvente y a que estos árboles son poco frondosos y dejan pasar gran parte de la luz solar.</p> <p>Para comprobar la veracidad de estas suposiciones se debe simular la componente vertical del cielo.</p>
Oriente	Árboles	<p>Presenta algunos árboles que sobrepasan la envolvente, por lo que constituyen obstrucciones. Esta fachada no es tan crítica como la norte y la sur, pues sólo se afecta la luz natural que llega a la cafetería, la cual no requiere un nivel de iluminación tan alto por las actividades que se realizan en ella. Por lo tanto, es posible que la luz solar que pasa a través de las hojas de los árboles sea adecuada para sus necesidades</p> <p>Es necesario realizar el análisis de las componentes verticales del cielo para verificar si se viola el derecho a la luz en esta fachada.</p>
Occidente	E3T	<p>La obstrucción que sobrepasa el plano de la envolvente es parte del Edificio E3T, violando el derecho a la luz del aula 307. El impacto de las obstrucciones es posiblemente mayor que en las demás fachadas porque el edificio no deja filtrar parte de la luz solar, como si ocurre cuando la obstrucción es causada por los árboles.</p> <p>Para conocer si realmente se viola el derecho a la luz en el aula 307 se debe ejecutar el análisis componentes verticales del cielo.</p>

Tabla 6.5. Observaciones sobre los objetos que obstruyen la luz natural que llega al EEEIE de acuerdo a su altura.

De acuerdo a la Tabla 6.5, en todas las fachadas del EEEIE es violado potencialmente el derecho a la luz natural, pues la altura de algunos objetos aledaños supera el plano de la envolvente. Para confirmar si esto ocurre en realidad se debe realizar el análisis de las componentes verticales del cielo, como lo establece la BRE.

- **Componente vertical del cielo**

Teniendo en cuenta el análisis de la envolvente, la altura de los objetos aledaños al EEIE implica la posibilidad de que se viole el derecho a la luz. Según la BRE, para comprobarlo se debe proceder al cálculo de la componente vertical del cielo en el centro de cada ventana [1].

La componente vertical del cielo es una medida establecida por la BRE 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. Un VSC del 27% o mayor se requiere para tener un buen aprovechamiento de la luz natural [3].

En la Figura 6.6 se muestran los resultados del cálculo de la VSC realizado por *Autodesk Ecotect Analysis* para cada fachada del EEIE. Los valores del VSC se presentan gráficamente sobre las ventanas del EEIE, teniendo en cuenta los valores asociados a cada color de acuerdo a la escala presentada en la parte inferior de la figura.

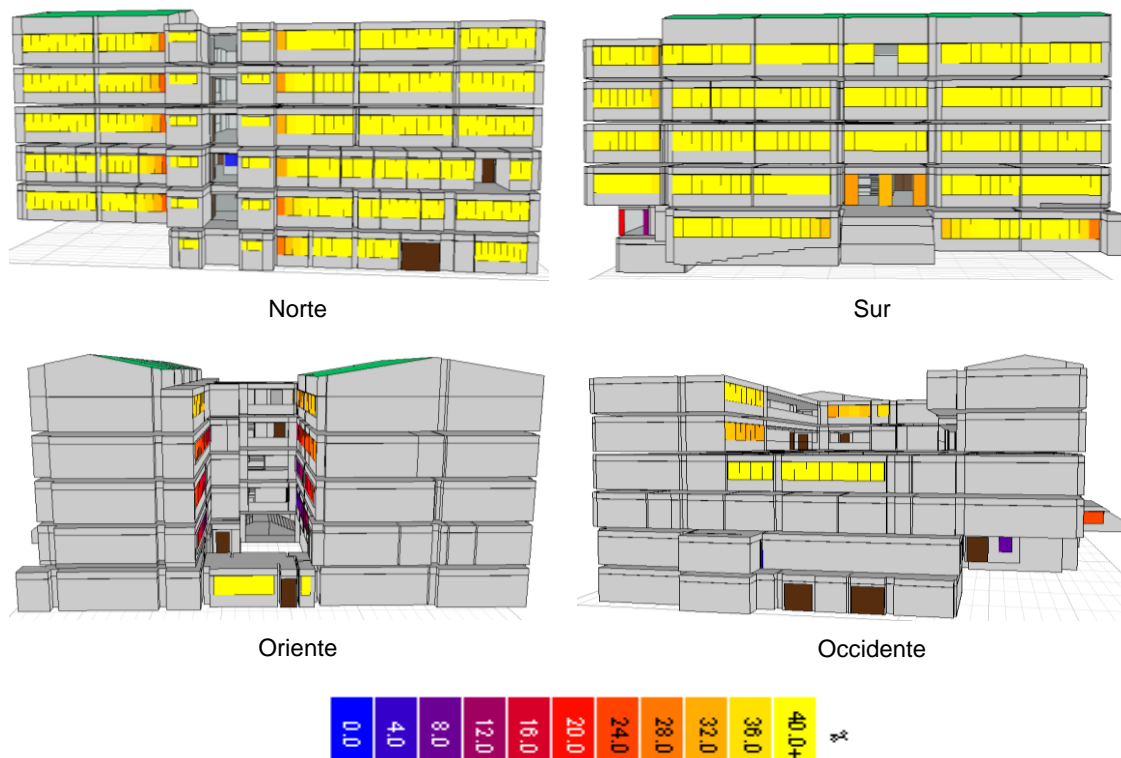


Figura 6.6. Resultados del cálculo del VSC en las fachadas del EEIE.

A partir de los resultados de la simulación del VSC se puede ver que a todas las ventanas exteriores del EEIE llega una cantidad de luz natural igual o mayor que la definida por la BRE, que equivale a tener un VSC mayor al 27%. Las ventanas que tienen un VSC menor son aquellas que se encuentran al interior del EEIE, debido a la obstrucción que presenta la misma edificación al paso directo de la luz

natural. Como esta reducción no es producida por objetos cercanos al edificio, se considera que no existe violación al derecho a la luz del EEEIE.

No se hace el análisis de la línea sin cielo de las aulas, pues no se presenta violación del derecho a la luz, según lo establece la BRE. Por esta misma razón no se considera el derecho a la luz como uno de los factores para la selección de los puntos críticos del EEEIE que serán calibrados en futuros trabajos de grado.

6.2.5. Distribución de ganancias térmicas individuales

Se realizó el análisis de las ganancias térmicas de cada zona preseleccionada, descompuestas en ganancias de calor directo, indirecto, por materiales e inter-zonas.

En el ANEXO S se muestran los resultados de las simulaciones de ganancias térmicas de las zonas preseleccionadas, de los cuales se pueden concluir que las ganancias directas del Aula 307, Aula 304 y Salón Excelencia, son cero durante todo el día. La característica más relevante de estas zonas es su ubicación en el edificio, pues a sus ventanas se encuentran al interior de edificio y no les llega radiación solar directa.

De manera contraria, el acceso principal y Aula 515 son las zonas con más ganancias directas; está última por encontrarse en el último nivel del edificio, y tener dos fachadas con ventanales: en sentido norte y sur (internos).

Las ganancias internas son las de mayor magnitud, y su comportamiento coincide con el horario de ocupación definido, dependiendo del encendido de luces, computadores, y la presencia de personas al interior de las zonas aportando calor. La sala de cómputo es la zona con mayores ganancias internas, pues es el aula con más computadores del edificio, y el aporte de calor de éstos es más alto que el de las demás fuentes de ganancias internas.

De las aulas preseleccionadas la única que presenta ganancias inter-zonas es el acceso principal, ya que en ella se infiltra parte de las ganancias externas. El

resto de zonas presentan pérdidas inter-zonas asociadas a las ganancias internas, pues entre ellas y el exterior se produce un intercambio de calor.

6.2.6. Determinación del *Daylight Factor* (simulaciones de iluminación natural)

Cabe destacar una vez más, que el *daylight factor* es un valor que depende solamente de la geometría del espacio y sus condiciones constructivas (ventanas, obstrucciones, nivel, fachada, etc.). Es 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 [12].

En la Figura 6.7 se resumen los resultados de las simulaciones del *daylight factor* para cada uno de los espacios preseleccionados, las cuales se presentan en el ANEXO T.

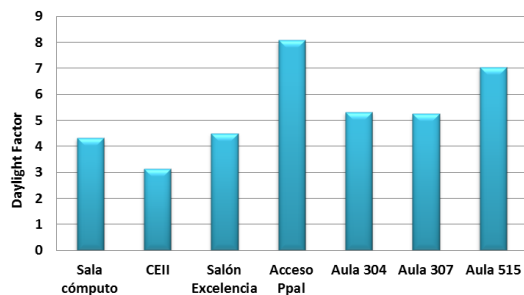


Figura 6.7. Valor del daylight factor para cada uno de los espacios preseleccionados.

Como se puede observar en la Figura 6.7, el espacio más crítico, es el Centro de Estudios con un DF=3,14, este es un resultado esperado, pues se encuentra en el primer nivel de la edificación, y el ingreso de iluminación natural a través de sus ventanas es muy limitado.

Por otra parte, la Figura 6.8, muestra el porcentaje de tiempo al año en que los espacios pueden operar con las luces apagadas para los dos sistemas de control de iluminación.

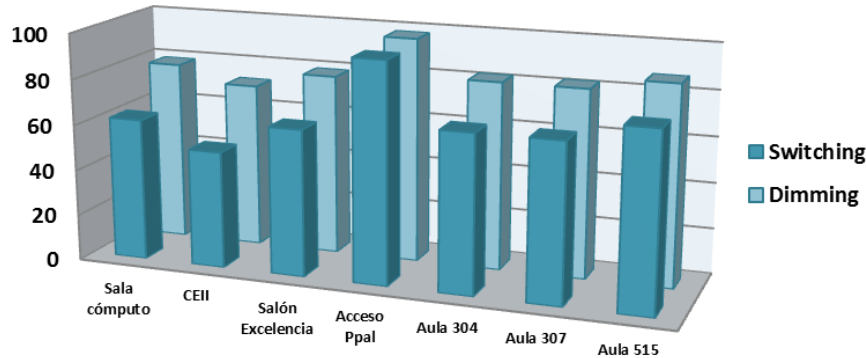


Figura 6.8. El porcentaje de tiempo al año en que los espacios preseleccionados pueden operar con las luces apagadas para los dos tipos de control de iluminación.

Al realizar una comparación entre éstos, se concluye que el sistema de control por interruptor de atenuación (*dimming*), es más eficiente que el control de encendido / apagado (*switching*) para todos los espacios, y que en promedio se podrían tener ahorros del orden del 13%, manteniendo el nivel de iluminación requerido, pues se aprovechan mejor las condiciones de iluminación natural.

Como una anotación final, se resalta que para espacios con un *daylight factor* alto (de valor igual a 8 o superior), es posible que el cambio del control de iluminación no sea tan llamativo, como es el caso del acceso principal del EEEIE, que tiene un $DF=8,08$, y la diferencia de las horas al año trabajando con luces apagadas entre los dos sistemas es de apenas el 2%.

6.3. SELECCIÓN DE LOS ESPACIOS CRITICOS.

Como se explicó previamente, los espacios considerados críticos, y son aquellos que presentan comportamiento térmico o lumínico más desfavorable para el confort de sus ocupantes, o con marcadas diferencias respecto a otros espacios analizados.

Para su selección se parte de las simulaciones ejecutadas en el numeral anterior. En la Tabla 6.6 se resumen los resultados y se indica en color amarillo el espacio que presenta el comportamiento más crítico según cada simulación ejecutada.

Zona	Grados-hora de desconfort [k°C-h]	Horas de confort anuales [%]	Energía promedio anual [kWh]						Factor de luz natural
			Directa	Indirecta	Inter-zona	Ventilación	Internas	Materiales	
Aula 111 – Sala de Cómputo	28,2	47,7	2,4	1,1	-298,8	-0,048	127,0	-1,0	4,2
Aula 102 – Centro de estudios	70,2	74,8	1,0	0,3	-524,5	-0,004	80,7	-0,4	3,1
Aula 103 – Salón Excelencia	6,0	98,6	0	1,3	-26,2	-0,119	28,0	-0,35	4,5
Acceso Principal	3,7	65,7	11,4	0,9	2,5	-2,57	31,4	-1,7	8,0
Aula 304	33,9	98,0	0	0,35	-66,8	-0,687	36,1	-0,01	5,3
Aula 307	17,6	92,5	0	1,1	-5,3	-0,855	37,8	-0,3	5,3
Aula 515 – Auditorio Enrique D	8,1	99,2	10,9	2,2	-47,8	-0,085	54,4	-3,0	7,0

Tabla 6.6. Resultados de simulaciones para identificar puntos críticos del EEEIE.

Los espacios analizados que presentan comportamientos más críticos son la Sala de Cómputo, Centro de Estudios, Acceso Principal y Aula 515. Se sugiere que la calibración del BIM del EEEIE se haga teniendo en cuenta estos espacios.

En la Tabla 6.7 se presentan características de los espacios considerados críticos del EEEIE, y se resumen las razones de su selección.

Zona	Fachada	Área [m ²]	Ubicación de las ventanas	Tiempo de uso [h/semana]	Ocupación máxima (personas sentadas)	Observaciones
Aula 102 – Centro de estudios	S	168	S	50	102	De acuerdo a los análisis previos, esta aula presenta el mayor valor de grados-hora de desconfort anuales y de pérdidas inter-zona. Su factor de luz natural es el menor de todos los espacios preseleccionados.
Aula 111 – Sala de Cómputo	NO	76	N	47	36	Es la zona con menos horas de confort anuales y mayores ganancias internas. Presenta pérdidas considerables entre-zonas.
Acceso Principal	NO	139	S	Constante durante el día	Variable durante todo el tiempo y baja	Presenta las mayores pérdidas por ventilación.
Aula 515 – Auditorio Enrique Daccarett	N-E	201	N/S(int)	N.D.	N.D	Aula con mayor área del EEEIE, que presenta un número de grados hora anuales relativamente bajos, teniendo en cuenta su tamaño y ocupación. Sin embargo registra las mayores ganancias directas, e indirectas, y las mayores pérdidas por materiales.

S:Sur – N:Norte - O: Oeste – E:Este- N.D. Información no disponible- int: ventanas que dan hacia dentro del edificio-N.A. :No aplica.

Tabla 6.7. Características de aulas consideradas críticas del EEEIE y razones de su selección.

Referencias Bibliográficas

- [1] Marsh, Andrew; Autodesk Inc. Help Ecotect 2011. 2010.
- [2] C. Pérez, H. Campbell, A. Borroto y J. Monteagudo, «Horas-grado, un criterio realista para caracterizar climatológicamente una región con propósitos de uso eficiente y ahorro de energía eléctrica,» [En línea]. Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar07/HTML/articulo04.htm>. [Último acceso: 17 Mayo 2012].

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

Las edificaciones son responsables del consumo de recursos naturales y de la emisión de residuos, y en consecuencia, su existencia va en detrimento del medio ambiente. Es por ello, necesario trabajar para que su ciclo de vida (construcción, operación y desecho) sea sostenible [1].

La sostenibilidad ambiental de una edificación se logra cuando el impacto de su existencia no supera un determinado umbral, lo que significaría que el entorno puede soportarla en el tiempo [1].

Actualmente, tales condiciones límite no han sido precisadas; por lo que es un error afirmar que las edificaciones actualmente desarrolladas son sostenibles, aunque sean acreedoras de una certificación LEED; esto a pesar de esfuerzos en sectores, como el de la construcción, para lograr edificaciones más amigables con el medio ambiente. Lo que sí es posible concluir es si un proyecto es más sostenible que otros [1].

Es importante resaltar, que si bien el EEEIE es una de las edificaciones recientemente remodeladas, su diseño no se concibió desde un enfoque de sostenibilidad energética, por ejemplo, desde el estándar LEED. Aun así, este trabajo de grado es el primer paso para determinar su nivel de sostenibilidad.

7.1 Sistema de certificación LEED

El estándar LEED (*Leadership in Energy and environmental design*), es actualmente el líder en la certificación de edificios verdes alrededor del mundo. Se define como un sistema de evaluación del desempeño de las edificaciones, impulsado y respaldado por el USGBC *United States Green Building Council*.

Su objetivo es incentivar y acelerar la adopción global de las prácticas y desarrollo de edificios verdes sostenibles. Permite valorar el desempeño de una edificación en diferentes escenarios como: “*green building design and construction (new construction, core and shell, schools, major renovations, healthcare)*, *green interior design and construction (commercial interiors and retails)*, *green building operations and maintenance (existing buildings: operations and maintenance)*, *green neighborhood development (neighborhood development)* and *green home design and construction (homes)*” [1].

A partir de un análisis y evaluación, los edificios pueden recibir una certificación y una clasificación según los puntos acumulados durante dicha evaluación. El estándar promueve un enfoque completo de sostenibilidad, al reconocer capacidades en siete áreas claves para la evaluación del edificio representadas en la Figura 7.1:

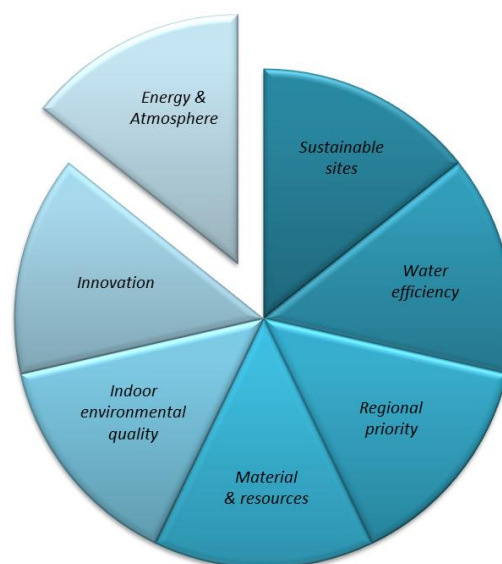


Figura 7.1. Categorías de evaluación del estándar LEED [2].

Existen además, cuatro niveles de certificación de acuerdo al grado de aplicación de las recomendaciones de sostenibilidad del edificio evaluado en 110 puntos base, de los cuales 6 puntos son por posibles innovaciones en el diseño y 4 puntos de prioridad regional obteniendo, la clasificación mostrada en la Figura 7.2.

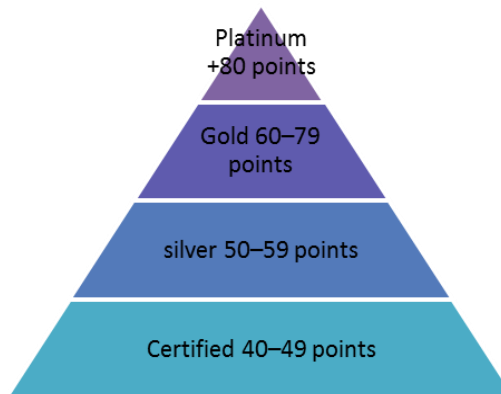


Figura 7.2. Niveles de Certificación LEED [2].

Dentro del estándar LEED, existen algunos términos importantes para entender correctamente el sistema de puntuación, los cuales son definidos a continuación:

- Prerrequisitos: Son lineamientos de cumplimiento obligatorio en una edificación que se desee certificar bajo el estándar LEED [2].
- Créditos: Son lineamientos de cumplimiento opcional. Cada crédito otorga un determinado número de puntos [2].
- Puntos: Valoración cuantitativa dada por el cumplimiento de un crédito. Algunos créditos permiten el otorgamiento de puntos con un cumplimiento parcial [2].

Un proyecto en el momento de ser evaluado, debe satisfacer todos los prerrequisitos y alcanzar un número de puntos mínimo para obtener la certificación. 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. Esta categoría requiere el cumplimiento de tres

prerrequisitos para poder optar la certificación, los cuales se muestran en la Tabla 7.1:

PRERREQUISITO	OBJETIVO
Comisionamiento fundamental de los sistemas de energía	Verificar que los sistemas del edificio relacionados con la energía están instalados, calibrados y se cumplen con los requisitos del proyecto, las bases de diseño, y los documentos de construcción.
Cumplimiento mínimo de desempeño energético del edificio	Establecer el nivel mínimo de eficiencia energética propuesta para el edificio y los sistemas.
Gestión fundamental de refrigerantes	Reducir el agotamiento de la capa de ozono.

Tabla 7.1. Prerrequisitos para la categoría *Energy and Atmosphere* [2].

Y el puntaje que se puede obtener para esta categoría se distribuye entre los créditos o requerimientos que aparecen en la Tabla 7.2:

CRÉDITO	PUNTOS	OBJETIVO
Optimización del comportamiento energético (modelación de energía)	1-19	Lograr niveles crecientes de eficiencia energética por encima de la línea de base en la norma importante para reducir los impactos ambientales y económicos asociados con el uso excesivo de energía.
Energía renovable en el lugar	1-7	Estimular y reconocer el uso de energía renovable local y autoabastecimiento sobre los impactos negativos al medio ambiente y económicos asociados con el uso de energía de combustibles fósiles
Comisionamiento avanzado	2	Análisis a la fase inicial del proceso de diseño y ejecución de actividades adicionales.
Gestión avanzada de refrigerantes	2	Reducir el agotamiento de la capa de ozono y el cumplimiento de apoyo temprano del Protocolo de Montreal y reducir al mínimo directa contribuciones al calentamiento global.
Medición y verificación del desempeño del edificio	3	Adoptar medidas para el ahorro de consumo de energía del edificio a través del tiempo.
<i>Green power</i> (energía limpia)	2	Fomentar el desarrollo y el uso de la red de origen, tecnologías de energía renovable sobre una base neta de contaminación cero.

Tabla 7.2. Créditos para la categoría *Energy and Atmosphere* [2].

7.2 Valoración LEED a priori del EEEIE

El objetivo principal de las aplicaciones sostenibles es lograr un menor consumo de energía eléctrica desde tres enfoques, el no consumo (iluminación natural, ventilación natural), el aprovechamiento de la energía en sitio (no aplicable al caso del EEEIE), y el uso de tecnología de alta eficiencia (iluminación fluorescente, iluminación LED, etc.) [1].

Dado que el costo de un eventual proceso de certificación oscila entre doscientos y cuatrocientos millones de pesos [1], además que la edificación no fue diseñada ni construida para obtener una certificación, el interés de evaluarla es sólo para determinar cualitativamente su nivel de sostenibilidad energética.

Con el objetivo de definir el nivel mínimo de eficiencia energética para el EEEIE es necesario establecer un *baseline*, conforme al Apéndice G, del *ASHRAE/IESNA 90.1-2007*, que determina los estándares energéticos para edificaciones (con excepción de edificios residenciales pequeños), utilizando un modelo de simulación por computador para el proyecto de edificio.

Una edificación que busque una certificación LEED, debe demostrar una mejora en su rendimiento energético de, al menos 10% para edificios nuevos, o una mejora del 5% en el caso de remodelaciones de edificios existentes, en comparación con su *baseline*.

Ya que el BIM se ha construido teniendo en cuenta las condiciones ambientales y de operación, todos los aspectos geométricos, arquitectónicos y demás, tal como es requerido en el *ASHRAE/IESNA 90.1-2007* para el modelo de simulación por computador, se podría considerar que sólo hace falta definir un *baseline* con base en criterios del entorno, de los sistemas control de iluminación y las cargas de HVAC del EEEIE, presentados en la Tabla 7.3.

Parámetro	SISTEMA DE CONTROL		
	<i>Baseline</i>	EEEIE (Escenario real)	EEEIE (Escenario ideal)
Iluminación	Manual (Modelado como encendido / apagado)	Manual (Modelado como encendido / apagado)	Interruptor con Atenuación
Aire Acondicionado	Aire acondicionado permanente	Aire acondicionado permanente	Sistema de modo combinado

Tabla 7.3. Definición *a priori* del *baseline* para EEEIE.

Además de eso, se definen dos escenarios para el EEEIE, uno real, que tiene en cuenta el sistema de control empleado actualmente, y uno ideal, donde se asumen sistemas de control más eficientes (sistema de modo combinado e interruptores de atenuación). Esto con el fin de evaluar LEED para ambos escenarios y realizar una comparación entre ellos.

En la Tabla 7.4 se presenta la evaluación de los prerrequisitos de la categoría *Energy and Atmosphere* para el EEEIE.

PRERREQUISITO	EVALUACIÓN	APROBADO
Comisionamiento fundamental de los sistemas de energía	Gracias a la información recopilada durante la fase inicial de este trabajo de grado, se ha comprobado que efectivamente que se cumple el objetivo del prerrequisito.	Sí
Cumplimiento mínimo de desempeño energético del edificio	Construir un modelo de simulación por computador y definir el <i>baseline</i> para EEEIE son algunos de los resultados de la ejecución de este trabajo de grado.	Por realizar
Gestión fundamental de Refrigerantes	El refrigerante usado en el EEEIE es R-410A ²³ que es un gas libre de CFC y que cumple con los términos y acuerdos del protocolo de Montreal.	Sí

Tabla 7.4. Evaluación de los prerrequisitos de la categoría *Energy and Atmosphere*.

La Tabla 7.5, presenta la evaluación de cada uno de los créditos de la categoría *Energy and Atmosphere* con respecto al *baseline*, para los dos escenarios planteados, teniendo en cuenta las condiciones del EEEIE.

CRÉDITO	EVALUACIÓN (Escenario real)	EVALUACIÓN (Escenario ideal)
Optimización del comportamiento energético (modelación de energía)	La gestión energética del edificio es la misma planteada para el <i>baseline</i> por lo tanto no hay un porcentaje de mejoramiento en el rendimiento energético.	De acuerdo a lo planteado en capítulos anteriores, implementando sistemas de control para iluminación y aires acondicionados, podrían obtenerse mejoras en el rendimiento superiores al 90% (para el sistema de aire acondicionado) y 10% (para los sistemas de iluminación).
Energía renovable en sitio	El EEEIE no tiene ningún sistema de generación renovable integrado.	La integración de sistemas de energía renovable (paneles solares fotovoltaicos) permitiría obtener 18,93[MWh/mes], considerando que la energía eléctrica generada en la Universidad Industrial de Santander sería 254[kWh/m ² /año] [1].

²³ Especificado en la licitación pública No 016 de 2009 de la UIS, sobre el suministro, montaje y puesta en funcionamiento del sistema de aire acondicionado para la modernización y ampliación de la planta física del Edificio de Ingeniería Industrial. Disponible en línea en:

https://www.uis.edu.co/procesos_contratacion/contrataciones/licitaciones/licitaciones_2009/licitacion_016/definitivos/V2_PCD_L016AA_2009.pdf

Comisionamiento avanzado	El EEEIE es un construcción de tipo tradicional y durante su ejecución no se tuvo en cuenta los lineamientos LEED.	De acuerdo al estándar LEED, antes del comienzo de la fase de documentación de la construcción, se debe designar una autoridad independiente puesta en marcha para dirigir, revisar y supervisar la realización de todas las actividades.
Gestión avanzada de refrigerantes	Ya que de acuerdo a los pliegos de la licitación No 016 de 2009 de la UIS, se exige el uso de refrigerante R-410A, que tiene un ODP (<i>ozone Depletion Potential of refrigerant</i>) de 0, se asume una buena gestión avanzada de refrigerantes.	Considerando que se tiene una gestión avanzada de refrigerantes adecuada, se mantiene.
Medición y verificación del desempeño del edificio	No se tienen instalados equipos que permitan la medición y/o verificación del desempeño energético del edificio.	Se deben instalar equipos que permitan, de forma permanente, medir y verificar el desempeño energético del edificio por el costo que ello conlleva.
<i>Green power</i> (energía limpia)	Debido a que el consumo de energía eléctrica del EEEIE es mediano, se clasifica de acuerdo a la reglamentación colombiana como usuario regulado, por lo cual el edificio será alimentado desde la redes de media tensión de la ESSA.	Las condiciones presentadas para el escenario real se mantienen para este crédito.

Tabla 7.5. Evaluación de los créditos de la categoría *Energy and Atmosphere* para los dos escenarios contemplados.

De [2] se ha tomado el formato presentado en las Tablas 7.6 y 7.7 que resumen la puntuación otorgada a cada uno de los créditos, para ambos escenarios. Se puede apreciar que para el primer escenario (real), el porcentaje sobre el total de puntos es muy bajo (5,71%), y que desde la óptica de la eficiencia energética, difícilmente se podría aspirar a una certificación.

2		Energy and Atmosphere	Possible Points: 35
Ptos			
✓	Prereq 1	Fundamental Commissioning of Building Energy Systems	
✓	Prereq 2	Minimum Energy Performance	
✓	Prereq 3	Fundamental Refrigerant Management	
0	Credit 1	Optimize Energy Performance	1 to 19
		Improve by 12% for New Buildings or 8% for Existing Building Renovations	1
		Improve by 14% for New Buildings or 10% for Existing Building Renovations	2
		Improve by 16% for New Buildings or 12% for Existing Building Renovations	3
		Improve by 18% for New Buildings or 14% for Existing Building Renovations	4
		Improve by 20% for New Buildings or 16% for Existing Building Renovations	5
		Improve by 22% for New Buildings or 18% for Existing Building Renovations	6
		Improve by 24% for New Buildings or 20% for Existing Building Renovations	7
		Improve by 26% for New Buildings or 22% for Existing Building Renovations	8
		Improve by 28% for New Buildings or 24% for Existing Building Renovations	9
		Improve by 30% for New Buildings or 26% for Existing Building Renovations	10
		Improve by 32% for New Buildings or 28% for Existing Building Renovations	11
		Improve by 34% for New Buildings or 30% for Existing Building Renovations	12
		Improve by 36% for New Buildings or 32% for Existing Building Renovations	13
		Improve by 38% for New Buildings or 34% for Existing Building Renovations	14
		Improve by 40% for New Buildings or 36% for Existing Building Renovations	15
		Improve by 42% for New Buildings or 38% for Existing Building Renovations	16
		Improve by 44% for New Buildings or 40% for Existing Building Renovations	17
		Improve by 46% for New Buildings or 42% for Existing Building Renovations	18
		Improve by 48%+ for New Buildings or 44%+ for Existing Building Renovations	19
0	Credit 2	On-Site Renewable Energy	1 to 7
		1% Renewable Energy	1
		3% Renewable Energy	2
		5% Renewable Energy	3
		7% Renewable Energy	4
		9% Renewable Energy	5
		11% Renewable Energy	6
		13% Renewable Energy	7
0	Credit 3	Enhanced Commissioning	2
2	Credit 4	Enhanced Refrigerant Management	2
0	Credit 5	Measurement and Verification	3
0	Credit 6	Green Power	2

Tabla 7.6. Resumen de la puntuación considerando un escenario real.

29		Energy and Atmosphere	Possible Points: 35
Ptos			
✓	Prereq 1	Fundamental Commissioning of Building Energy Systems	
✓	Prereq 2	Minimum Energy Performance	
✓	Prereq 3	Fundamental Refrigerant Management	
19	Credit 1	Optimize Energy Performance	1 to 19
		Improve by 12% for New Buildings or 8% for Existing Building Renovations	1
		Improve by 14% for New Buildings or 10% for Existing Building Renovations	2
		Improve by 16% for New Buildings or 12% for Existing Building Renovations	3
		Improve by 18% for New Buildings or 14% for Existing Building Renovations	4
		Improve by 20% for New Buildings or 16% for Existing Building Renovations	5
		Improve by 22% for New Buildings or 18% for Existing Building Renovations	6
		Improve by 24% for New Buildings or 20% for Existing Building Renovations	7
		Improve by 26% for New Buildings or 22% for Existing Building Renovations	8
		Improve by 28% for New Buildings or 24% for Existing Building Renovations	9
		Improve by 30% for New Buildings or 26% for Existing Building Renovations	10
		Improve by 32% for New Buildings or 28% for Existing Building Renovations	11
		Improve by 34% for New Buildings or 30% for Existing Building Renovations	12
		Improve by 36% for New Buildings or 32% for Existing Building Renovations	13
		Improve by 38% for New Buildings or 34% for Existing Building Renovations	14
		Improve by 40% for New Buildings or 36% for Existing Building Renovations	15
		Improve by 42% for New Buildings or 38% for Existing Building Renovations	16
		Improve by 44% for New Buildings or 40% for Existing Building Renovations	17
		Improve by 46% for New Buildings or 42% for Existing Building Renovations	18
		19 Improve by 48%+ for New Buildings or 44%+ for Existing Building Renovations	19
5	Credit 2	On-Site Renewable Energy	1 to 7
		1% Renewable Energy	1
		3% Renewable Energy	2
		5% Renewable Energy	3
		7% Renewable Energy	4
		5 9% Renewable Energy	5
		11% Renewable Energy	6
		13% Renewable Energy	7
0	Credit 3	Enhanced Commissioning	2
2	Credit 4	Enhanced Refrigerant Management	2
3	Credit 5	Measurement and Verification	3
0	Credit 6	Green Power	2

Tabla 7.7. Resumen de la puntuación considerando un escenario ideal.

De lo observado en la Tabla 7.7, se concluye que la puntuación mejora significativamente (83%), si desde el principio la construcción se realiza desde un enfoque de sostenibilidad energética (como por ejemplo, la implementación de sistemas de iluminación y aire acondicionado más eficientes), lo cual puede implicar una fuerte inversión inicial, pero también importantes ahorros financieros en cuanto al consumo.

Por último, cabe señalar que para llevar a cabo una evaluación LEED formal, se hace necesario cuantificar el ahorro por la reducción en el consumo de energía de las redes públicas en comparación a un escenario de consumo tradicional. Tal reducción del consumo debe ser monitorizada para evidenciar la efectividad de los sistemas, y con ello, obtener los puntos asociados a créditos de la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED. Adicionalmente, sería conveniente estimar la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO₂, producto de la implementación de las aplicaciones sostenibles.

Referencias Bibliográficas

- [1] G. A. Osma Pinto, Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el Edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Dirigido por Dr. Gabriel Ordóñez Plata: Universidad Industrial de Santander, Trabajo de investigación de maestría, 2011.
- [2] U.S Green Building Council (USGBC), LEED, [En línea]. Available: <http://www.usgbc.org/DisplayPage.aspx?CategoryID=19>. [Último acceso: 20 Agosto 2012].

8. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen los resultados y conclusiones más relevantes obtenidos durante la realización del trabajo de investigación y se establecen algunas consideraciones y recomendaciones para la continuidad en trabajos futuros en esta área. Los resultados y las conclusiones del trabajo de investigación se abordan a continuación por cada uno de los capítulos.

8.1 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES A PARTIR DE *AUTODESK ECOTECT ANALYSIS* (Capítulo 2)

La propuesta metodológica es una herramienta, que desde la perspectiva energética brinda posibilidades de analizar computacionalmente cualquier tipo de edificación, a través de las simulaciones realizadas con el programa *Autodesk Ecotect Analysis*, considerando además la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED V3.0.

La propuesta metodológica se definió en cinco (5) fases: (i) creación del modelo de información de la edificación (BIM), (ii) guía de interpretación de simulaciones preliminares y definición de puntos críticos, (iii) pre-evaluación LEED V3, (iv) calibración del BIM y (v) simulaciones y análisis.

En este trabajo de grado se realizó la evaluación energética del EEEIE, siguiendo los lineamientos de dicha propuesta metodológica. Se logró adelantar la

ejecución de las tres primeras fases, y las dos restantes se ejecutarán en trabajo de grado posteriores.

En el desarrollo de la metodología se generaron elementos de valor agregado como, el manejo de las herramientas computacionales *Autodesk Ecotect Analysis* (i.e. *Graphisoft ArchiCAD*, *Autodesk Revit* y *Google SketchUp*), la creación del modelo BIM, y el análisis y desarrollo de simulaciones energéticas, finalmente la ejecución de la pre-evaluación LEED V3.0.

Cada fase se desglosa en etapas para facilitar la comprensión y ejecución del proceso planteado. Éstas, a su vez, se describen detalladamente y se dan indicaciones para su mejor ejecución.

Se recomienda que la Fase 1 se ejecute partiendo de la exploración inicial de *Autodesk Ecotect Analysis*, prestando especial atención a las herramientas que tiene para crear el BIM de una edificación y las simulaciones de variables (térmicas, lumínicas y de radiación solar) que inciden en el comportamiento energético. Posteriormente, se procede a recopilar datos de la estructura del edificio, incluyendo materiales y planos arquitectónicos. Se sigue con la creación del modelo tridimensional de la edificación, para lo cual se recomienda usar zonas térmicas y herramientas gráficas con mayor facilidad de manejo que *Autodesk Ecotect Analysis* (i.e. *Graphisoft ArchiCAD*, *Autodesk Revit* y *Google SketchUp*) cuando las edificaciones estén compuestas por varias aulas y pisos. Luego se asignan los materiales constructivos de la edificación, teniendo en cuenta que *Autodesk Ecotect Analysis* requiere que se especifique un material primario (que constituye el elemento) y otro alternativo (material del elemento adyacente), y definiendo la tolerancia de adyacencia entre elementos cercanos, para que el programa reconozca que se encuentran uno al lado del otro. Se deben especificar las condiciones de operación, de las aulas del edificio, requeridas por *Autodesk Ecotect Analysis*: ropa que usan sus ocupantes, humedad, velocidad del aire y nivel de iluminación mínimos, número máximo de personas que pueden estar en la zona, tipo de actividades que se realizan a su interior, ganancias que aportan equipos e iluminación, tasa de intercambio de aire entre zonas, tipo de sistema de

climatización y rango de temperaturas de confort. Finalmente se deben definir las obstrucciones que afectan la edificación, teniendo en cuenta planos y medidas en sitio para establecer su distribución y dimensiones; se aconseja el uso de *Google SketchUp* para su creación.

En la segunda fase se plantean consideraciones que se tuvieron en cuenta al hacer la guía de interpretación de simulaciones preliminares y definir puntos críticos de la edificación. La guía se describe como un compendio de las simulaciones que se ejecutan, y está centrada en explicar los métodos de cálculo utilizados por *Autodesk Ecotect Analysis* y las gráficas arrojadas. Para seleccionar los puntos críticos del edificio se empezó con la pre-selección de algunas aulas, teniendo en cuenta variables espaciales y de operación (ie. fachada, piso, cantidad de ventanas, ocupación y área). Posteriormente se ejecutaron las simulaciones convenientes para conocer el comportamiento energético de la edificación, y teniendo en cuenta estos resultados se seleccionaron los espacios críticos. Éstos serán los espacios usados para calibrar el BIM.

La tercera fase consiste en hacer la pre-evaluación del EEEIE según la sección *Energy and Atmosphere* del estándar LEED V3.0. Iniciando con la recopilación información sobre el estándar y el proceso de evaluación. Luego se debe definir el *baseline* del edificio, para finalmente realizar la pre-evaluación de la edificación. Su objetivo es conocer cómo se está comportando el modelo y servir como referencia cuando se esté realizando la evaluación final.

8.2 CREACIÓN DEL BUILDING INFORMATION MODELLING DEL EEEIE (Capítulo 3)

Se creó el Modelo de Información de Construcción (BIM - *Building Information Modelling*) del EEEIE, el cual contiene: geometría, materiales de los elementos constructivos (muros, pisos y techos), condiciones de operación de las aulas (ocupación, ganancias internas, sistema de climatización) y obstrucciones adyacentes (otros edificios y árboles).

A partir de la creación del modelo, se pudo concluir que usar *Graphisoft ArchiCAD* para crear el modelo geométrico de la edificación, que se importa a *Autodesk Ecotect Analysis*, representa una ventaja respecto a programas similares, pues permite definir el modelo en el formato que mejor interpreta *Autodesk Ecotect Analysis* (**.gbxml**) a partir de planos de planta en formato **.DWG**.

El formato de las zonas térmicas (**.gbxml**) presenta grandes ventajas con respecto al modelo de zonas geométricas (**.3ds**), ya que permite realizar los análisis térmicos y lumínicos en un mismo modelo, y presenta facilidad para introducir las características de la edificación, como materiales, volumen y adyacencia.

En el momento de asignar los valores de los parámetros, que determinan las condiciones internas como lo son ropa, humedad y velocidad del aire; se debe tener claridad en los valores a utilizar, por ejemplo, en la ropa se evalúa el factor de indumento, que tiene una escala de [0-3], siendo el cero para una persona desnuda y el tres para ropa tipo Ártico, por último, el viento se clasifica de acuerdo a su velocidad.

En la definición de los parámetros de ocupación, para cuantificar las ganancias de calor que aportan las personas dentro de la zona, se debe tener en cuenta la potencia disipada por cada una, dependiendo de que tan exigente sea la actividad física, por ejemplo una persona sedentaria disipa una potencia de 70 [W], mientras una persona que realice un trabajo pesado disipa 235 [W].

El modelado de las obstrucciones adyacentes se debe realizar con significativa exactitud, para esto se debe hacer una caracterización exhaustiva, lo cual no se hizo pues no es el objeto de este trabajo de grado; pero valdría la pena realizarlo posteriormente, para contar con un modelo más fiable para representar la influencia de las obstrucciones. Es de mencionar que durante la ejecución de este trabajo de grado se procuró considerar los obstáculos de mayor tamaño y cercanía porque su efecto en la radiación solar y vientos que inciden en el edificio es mayor.

Finalmente se establecen algunas recomendaciones generales que son una recopilación de experiencias e inconvenientes tenidos, durante la creación del

modelo del EEEIE, y que podrían ser de gran utilidad para trabajos de grado similares.

- El modelo debe hacerse lo mas simple posible, en caso de que se requiera realizar el modelo en un software diferente como *Graphisoft ArchiCAD* o *Autodesk Revit Architecture*, se deben usar solo elementos básicos (muros, forjados, techos, ventanas, puertas y aberturas).
- Cada espacio interior debe crearse siempre como una zona, y los elementos básicos no deben cruzarse entre zonas.
- Los materiales de todos los elementos se deben definir directamente en *Autodesk Ecotect Analysis*, pues no se reconocen correctamente en la importación desde otros programas, asignándoles un material por defecto a cada tipo de elementos.
- Si el modelo contiene muros curvos, se deben aproximar su forma a segmentos rectos.
- En la importación del modelo geométrico a *Autodesk Ecotect Analysis*, se suele presentar errores, especialmente con puertas y ventanas, ya que se ubican fuera del muro al que pertenecen, esto se corrige a través del comando *Link*.
- La herramienta software *Autodesk Ecotect Analysis*, permite la importación con *Google Sketch Up*, siendo útil para la creación de elementos no existentes en las librerías de *Autodesk Ecotect Analysis*, como lo son los cortasoles, escaleras y el modelado de obstrucciones.
- Si se presentan inconvenientes relacionados con la adyacencia entre zonas, se recomienda verificar la asignación del material primario correspondiente al real, y el material alternativo correspondiente al adyacente. Para considerar dos zonas cercanas, éstas deben estar a una distancia menor o igual a la tolerancia de adyacencia definida.
- Durante la creación del modelo en *Autodesk Ecotect Analysis*, se debe realizar un modelado de las obstrucciones adyacentes a la edificación, considerando los obstáculos de mayor tamaño y cercanía, debido al efecto producido en la radiación solar y vientos.

8.3 CREACIÓN DEL ARCHIVO DE DATOS METEOROLÓGICOS (Capítulo 4)

El archivo de datos meteorológicos incluye información importante que determina en gran medida el comportamiento térmico y lumínico de una edificación. Con el fin de crear un archivo que incluyera información acorde a los requerimientos de las simulaciones que realiza *Autodesk Ecotect Analysis*, se empezó por indagar y consultar en distintas fuentes para determinar las variables que debían ser consideradas. A partir de este proceso se concluyó que el archivo de datos meteorológicos debe incluir las siguientes variables:

Mes del año [1-12]	Día del mes [1-31]
Hora del día [0-23]	Temperatura de bulbo seco [°C]
Humedad relativa [%]	Humedad específica [g/kg]
Temperatura de punto de rocío [°C]	Velocidad del viento [m/s]
Irradiancia solar normal directa [W/m ²]	Dirección del viento [°E of N]
Irradiancia solar horizontal global [W/m ²]	Precipitación [mm]
Irradiancia solar difusa global [W/m ²]	Nubosidad [-]

La mayoría de los datos tenidos en cuenta para la creación del archivo meteorológico del EEEIE, fueron medidos por la estación meteorológica ubicada en el Edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, durante el periodo comprendido entre agosto 30 de 2010 y agosto 25 de 2011. La humedad específica y la irradiancia horizontal difusa y directa se calcularon indirectamente a partir de los datos de la estación. Debido a la carencia de información suficiente para calcular la nubosidad, se revisaron otras fuentes de información meteorológica de Bucaramanga, de las cuales sólo el IDEAM disponía de promedios mensuales de esta variable.

Los datos recopilados y calculados se organizaron en un documento de Excel, en el cual se ajustó su formato y unidades. Esta información se guardó en un archivo delimitado por comas, y posteriormente se importó al software Weather

Tool, en el que se convirtió al formato .wea que puede ser interpretado directamente por *Autodesk Ecotect Analysis*.

Como resultado de la ejecución de este capítulo se obtuvo un archivo meteorológico del EEEIE que puede ser usado para realizar simulaciones térmicas, lumínicas y de radiación solar. Además, se deja especificado de manera detallada el procedimiento y conceptos usados para su creación, con el fin de que sirva como una guía para establecer archivos meteorológicos de otras edificaciones que se deseen simular con *Autodesk Ecotect Analysis*.

8.4 GUÍA PARA INTERPRETACIONES DE SIMULACIONES (Capítulo 5)

Autodesk Ecotect Analysis es una herramienta computacional que permite ejecutar un gran número de simulaciones térmicas, lumínicas y de radiación solar. La exploración de cada una de ellas constituye una labor compleja debido a la gran cantidad de conocimientos que son requeridos y del tiempo necesario. Por lo tanto, fue necesaria la selección de un grupo de simulaciones que estuvieran orientadas a evaluar los consumos energéticos en cuanto a ventilación e iluminación.

Se planteó este capítulo como una guía de interpretación, necesaria para la ejecución de trabajos de grado futuros. Los resultados arrojados por las simulaciones son muy cercanos a lo esperado, a pesar de que el modelo utilizado no ha sido calibrado.

Por último se enlistan una serie de conclusiones referente al software *Autodesk Ecotect Analysis*, obtenidas durante el desarrollo del capítulo:

- *Autodesk Ecotect Analysis* realiza todos los cálculos térmicos, basado en el método de admitancias CIBSE.
- Se recomienda simular el confort térmico usando la simulación de grados hora de desconfort, y definir la franja de confort térmico de acuerdo al confort adaptativo con ventilación natural.

- El gráfico de cargas espaciales permite comparar la potencia que consumen los aires acondicionados cuando son la única forma de ventilar un espacio, con los requerimientos cuando se usa la ventilación natural en los momentos en que es posible.
- Los gráficos de distribución de ganancias de calor permiten ver la incidencia de distintos factores (i.e. radiación solar, ventilación, equipos y personas dentro del espacio) en el comportamiento térmico de las aulas.
- El derecho a la luz sirve para ver si los objetos cercanos al edificio obstruyen considerablemente la iluminación natural o no.
- El Factor de Luz Natural es un indicador del efecto de la geometría de un espacio en la iluminación natural que llega a su interior. Idealmente debe encontrarse entre 5%-9%.

8.5 IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DE LOS ESPACIOS INTERIORES DEL EEEIE (Capítulo 6)

De acuerdo con los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas al EEEIE se pudieron observar varios aspectos respecto al comportamiento de los diferentes puntos de las edificaciones:

- Las mayores temperaturas se registran en los espacios interiores con grandes ganancias internas (por afluencia de personas o la gran cantidad de equipos, pues son las principales fuentes de calor) y los ubicados en el último nivel debido a que las ganancias directas (debidas a la radiación solar) y las ganancias inter-zona son significativamente mayores que para los espacios ubicados en los demás niveles.
- Los cielorrasos actúan como un aislante térmico que almacena importantes cantidades de calor, de manera que las temperaturas en los espacios interiores se acercan más al punto de confort.
- Los espacios que tienen ventanas enfrentadas (ventilación cruzada) tienen un comportamiento térmico diferente, pues el flujo constante de aire enfría el lugar.

- La constante de retraso térmico o *thermal lag* es diferente para cada material y depende de las propiedades intrínsecas del mismo (admitancia, Transmitancia, reflectividad, etc.) y de su grosor. Esta constante retrasa la conducción de calor a un espacio cerrado de entre 4 y 8 horas, haciendo que las primeras horas de la mañana sean las más frescas, y que aún en las noches se conserve parte del calor entregado por el Sol durante el día.
- Se encontró que la fachada Occidente es crítica para la edificación pues durante todo el año recibe radiación solar en horas de la tarde.

8.6 PRE-EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA DEL EEEIE SEGÚN EL ESTÁNDAR LEED V3.0 (Capítulo 7)

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.

Aunque de acuerdo con las simulaciones realizadas, se concluye que la puntuación mejora significativamente (83%), si desde el principio la construcción se realiza desde un enfoque de sostenibilidad energética (como por ejemplo, la implementación de sistemas de iluminación y aire acondicionado más eficientes), lo cual puede implicar una fuerte inversión inicial, pero también importantes ahorros financieros en cuanto al consumo.

ANEXO A. Definiciones

AISLAMIENTO TÉRMICO: Capacidad de los materiales para para reducir el flujo de calor entre zonas calientes y frías. Se evalúa por su resistencia térmica y su unidad en el Sistema Internacional es $\text{m}^2 \text{K} / \text{W}$ ó $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$. El aislamiento térmico puede cumplir una o más de estas tres funciones: reducir la conducción térmica en el material, que corresponde a la transferencia de calor mediante electrones; reducir las corrientes de convección térmica que pueden establecerse en espacios llenos de aire o de líquido, y reducir la transferencia de calor por radiación, que corresponde al transporte de energía térmica por ondas electromagnéticas [1].

ALBEDO: Porcentaje de flujo luminoso reflejado o difundido por un cuerpo en relación con el flujo luminoso incidente. Un cuerpo negro tiene un albedo nulo [2].

ALTURA SOLAR [°]: Indica la elevación del haz de radiación solar directa (HRSD), se mide entre el HRSD y su proyección sobre el plano horizontal de referencia [3].

AZIMUT SOLAR: Ángulo que indica la orientación del haz de radiación solar, se mide entre su proyección sobre el plano horizontal de referencia y el eje del punto cardinal sur, según el sentido horario [3].

BIM (PROCESO): *Building Information Modeling*, proceso durante el cual se realiza el modelado de la información de construcción de un edificio, mediante la generación y gestión de datos del edificio durante su ciclo de vida utilizando software dinámico de modelado de edificios en tres dimensiones y en tiempo real [4].

CAD/CAM: Proceso en el cual se utilizan los ordenadores o computadoras para mejorar la fabricación, desarrollo y diseño de los productos. Éstos pueden fabricarse más rápido, con mayor precisión o a menor precio, con la aplicación adecuada de tecnología informática [5].

CALIDAD DEL AIRE: Es una indicación de cuanto aire está exento de polución atmosférica, y por lo tanto apto para ser respirado [6].

CIELO RASO: El siglo XX, con su arquitectura funcional y austera, impuso los techos planos y enlucidos, llamados cielos rasos, que en ocasiones se sustituyen por grandes módulos de material aislante. Un cielo raso es por tanto, un elemento constructivo situado a cierta distancia del forjado o techo propiamente dicho, que mejora el comportamiento térmico y acústico de la construcción y permite de forma más práctica, la incorporación de puntos de instalaciones (iluminación, climatización, etc) [7].

COEFICIENTE DE GANANCIA DE CALOR SOLAR: Fracción de la radiación solar incidente que pasa a través de una ventana, directamente transmitida y absorbida. Se expresa como un número entre cero (0) y uno (1). Entre menor es el coeficiente de ganancia de calor de una ventana, menos calor transmite [8].

COEFICIENTE DE RENDIMIENTO COP (*coefficient of performance*): Mide el desempeño de las bombas térmicas, es una medida adimensional ya que la carga de refrigeración y la potencia eléctrica necesaria para hacer funcionar el dispositivo se miden utilizando las mismas unidades, por ejemplo, Watts; y siempre es mayor que la unidad. Aunque esto puede parecer imposible, se debe a que en realidad se está moviendo calor usando energía, en lugar de producir calor como en el caso de las resistencias eléctricas. Una parte muy importante de este calor se toma de la entalpía del aire atmosférico. En toda bomba de calor se verifica que el calor transmitido al foco caliente es la suma del calor extraído del foco frío más la potencia consumida por el compresor, que se transmite al fluido [9].

Una bomba de calor típica tiene un *COP* de entre dos y seis, dependiendo de la diferencia entre las temperaturas de ambos focos [9].

El COP es una medida que no se ha adoptado, a diferencia del SEER²⁴, medida estandarizada por el *Department of Energy* DOE, que actualmente establece como mínimo la calificación de SEER 13 para la producción de Aires Acondicionados [10].

Un SEER de 13 es aproximadamente equivalente a un COP de 3.43, lo que significa que 3.43 unidades de energía térmica se eliminan del interior por una unidad de energía utilizada para ejecutar el trabajo del aire acondicionado o la bomba de calor [11].

COMPLEMENTO (INFORMÁTICA): En programación, el término se puede referir a un programa o un módulo que agrega funcionalidad o mejora el rendimiento de otro programa [12].

COMPORTAMIENTO ACÚSTICO: Se refiere al aislamiento acústico de una edificación, y se cuantifica de acuerdo a la transmisión del sonido a través de los materiales que la componen [13].

COMPORTAMIENTO LUMÍNICO: Cambios y tendencias de cualquier tipo de iluminación, donde se analizan todos los factores que la intervienen como deslumbramiento, uniformidad, dirección de los rayos luminosos, entre otros [14].

COMPORTAMIENTO TÉRMICO: Se relaciona con las características de ganancias y pérdidas de energía de una edificación. Es afectado por una relación compleja entre los componentes de la estructura, como ventanas y muros, y el ambiente (ventilación, radiación solar) [15].

CONFORT TÉRMICO (ECOTECT): Según la norma ISO 7730, es la condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico. El programa lo estima de tres formas diferentes: franjas planas de confort, neutralidad térmica y métodos adaptativos [16].

²⁴ Tasa de eficiencia energética por estación (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*)

CONFORT VISUAL: Grado de satisfacción visual creado por la iluminación. Es la sensación subjetiva que percibe el usuario [17].

DIAGRAMA DE TRAYECTORIA SOLAR (SUN-PATH): Diagrama que muestra los cambios significativos de la posición del sol y la duración del día de acuerdo a la época y hora, de acuerdo a la rotación de la Tierra sobre su eje y alrededor del Sol. Esta información, acompañada de las condiciones climáticas, sirve para tomar decisiones sobre la orientación, paisajismo y dispositivos de sombra del edificio, entre otros [18].

DIAGRAMAS BIOCLIMÁTICOS: También denominados cartas bioclimáticas, son sistemas de representación gráfica de las relaciones entre las diferentes variables térmicas que influyen en la sensación del confort térmico. Básicamente se trata de diagramas psicrométricos, es decir relacionan temperatura y humedad, sobre los que se establecen las condiciones de confort en función de los índices térmicos.

Una de las cartas bioclimáticas más habituales es la Carta Bioclimática de Olgay. Esta carta es un diagrama de condiciones básicas donde el eje de abscisas representa la humedad relativa y el de coordenadas la temperatura. Dentro de este diagrama se localiza una zona denominada de confort con cuyos valores temperatura-humedad del cuerpo humano tiene una sensación térmica agradable.

Cada zona dispone de una carta bioclimática específica, dependiendo de las condiciones particulares de temperatura y humedad, representativa del clima. Sobre dicha carta se pueden estudiar las desviaciones respecto a la zona de confort y cómo actuar para volver a la misma. [84] y [20].

DIRECCIÓN DEL VIENTO [°E OF N]: Es la dirección de donde procede el movimiento del aire [21].

ELEMENTO CONSTRUCTIVO: Cada una de las partes que forma un sistema constructivo, por ejemplo, los muros, las vigas, las puertas, etc [22].

EMISIVIDAD: Capacidad de un material para emitir energía radiante o la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a una diferencia de temperatura determinada [23].

EXTENSIÓN (ARCHIVO): Extensión, referido a los nombres de los archivos informáticos, conjunto de caracteres añadido a un nombre de archivo para definir su tipo o clarificar su significado. Un archivo puede tener un nombre de determinados caracteres de longitud seguidos de un punto (.) y una extensión de hasta tres caracteres (letras o números). La extensión puede ser asignada por el usuario, o bien puede venir impuesta por el programa, implicando una forma determinada de manejo [12].

FORJADO: Elemento constructivo que cubre un espacio, con el que se hacen las separaciones entre pisos, y que es capaz de transmitir las cargas que soporta, así como su propio peso, a los demás elementos de la estructura (vigas, pilares, muros) hasta que todas las cargas llegan a la cimentación [24].

GANANCIA DE CALOR: Incremento de calor en un espacio dado como resultado del calentamiento directo, debido a la radiación solar y al calor irradiado por otras fuentes como luminarias, equipos o personas [25].

GANANCIA TÉRMICA: Hace referencia a los mecanismos internos (cargas de iluminación, electrodomésticos) y a los mecanismos externos (radiación directa del sol o irradiación de la atmosfera) donde se gana calor [26].

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL: Herramienta que dirige las distintas tareas para las que se utilizan las computadoras mediante la ejecución de un conjunto de instrucciones [27].

HUMEDAD RELATIVA [%]: Es la razón entre el contenido efectivo de vapor en la atmósfera y la cantidad de vapor que saturaría el aire a la misma temperatura [28].

IMPORTAR (INFORMÁTICA): Incorporar a una aplicación objetos, documentos u otro tipo de archivos que fueron creados en otra aplicación, o que pertenecen a versiones antiguas de la misma aplicación.

LUZ NATURAL: Es una materia prima, procedente de fuentes difusas como la bóveda celeste, reflexión del suelo y puede penetrar en los lugares a través de huecos, donde transmite por radiación y reflexión [29].

MASA TÉRMICA: Valor de la capacidad potencial de almacenamiento de calor en un conjunto o sistema [30].

MÁSCARA DE SOMBRA (BIOCLIMÁTICA): Mecanismo para registrar cuales partes del cielo son visibles desde un punto específico del modelo y cuáles no. Esta información se puede superponer en un diagrama de la trayectoria solar para ver si el punto está afectado o no por la sombra proveniente de los obstáculos que lo rodean [31].

MICROCLIMA: Nombre que define el conjunto de condiciones climáticas propias de un punto geográfico o área reducida y que representan una modificación local del clima general del territorio debido a la influencia de distintos factores ecológicos. La acción combinada del relieve, la altitud, el suelo o la vegetación influye en la determinación de un microclima u otro [32].

MODELO DE INFORMACIÓN DE CONSTRUCCIÓN - BIM: *Building Information Model* es el producto del proceso de modelado de información de construcción de un edificio, que abarca la geometría del edificio, las relaciones espaciales, la información geográfica, así como las cantidades y las propiedades de los componentes del edificio como por ejemplo materiales [33].

MODELO: Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento [23].

NEUTRALIDAD TÉRMICA: Se refiere a la temperatura del aire a la cual, en promedio, un gran porcentaje de personas no sentirían calor ni frío. Esta temperatura es afectada por el clima promedio anual y fluctuaciones estacionales. Se considera que la zona de confort se encuentra $1,75^{\circ}\text{C}$ alrededor de la temperatura de neutralidad [34].

NUBOSIDAD [FRACCIÓN]: La nubosidad es la fracción de cielo cubierto con nubes, en un lugar en particular [35].

PRESIÓN ATMOSFÉRICA [PA]: Es el resultado del peso del aire sobre una determinada superficie [36].

PROGRAMAS CAD: Herramientas computacionales de diseño asistido por ordenador (CAD, acrónimo de Computer Aided Design), que pueden utilizarse para generar modelos con muchas, si no todas, de las características de un determinado producto. Estas características podrían ser el tamaño, el contorno y la forma de cada componente, almacenada como dibujos bi y tridimensional. Una vez que estos datos dimensionales han sido introducidos y almacenados en el sistema informático, el diseñador puede manipularlos o modificar las ideas del diseño con mayor facilidad para avanzar en el desarrollo del producto. Además, pueden compartirse e integrarse las ideas combinadas de varios diseñadores, ya que es posible mover los datos dentro de redes informáticas, con lo que los diseñadores e ingenieros situados en lugares distantes entre sí pueden trabajar como un equipo. Los sistemas CAD también permiten simular el funcionamiento de un producto, de este modo asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales en el diseño en sus respectivas actividades [5].

PROPIEDADES TÉRMICAS: Son las características de un material que cambian al ser sometido a calentamiento [37].

PSICROMETRÍA: Es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. Ampliando aún más, se incluiría el método de controlar las

propiedades térmicas del aire húmedo. Lo anterior, se puede llevar a cabo a través del uso de tablas psicrométricas o de la carta psicrométrica [20].

RADIACIÓN SOLAR: Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol [38].

REFLECTIVIDAD: Fracción de radiación incidente reflejada por una superficie [39].

RELACIÓN DE HUMEDAD [g/kg]: Relación existente entre la cantidad de vapor de agua y la cantidad de aire seco contenidos en una mezcla de ambos [40].

TASA DE RENOVACIÓN DEL AIRE: El número de veces que el volumen total de un local dado en pies cúbicos o metros cúbicos se cambia y se filtra en un minuto o en una hora [41].

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO [°C]: Es la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo, que no es diferente de un termómetro ordinario, excepto que tiene una pequeña mecha o pedazo de tela alrededor del bulbo. Si esta mecha se humedece con agua limpia, la evaporación de esta agua disminuirá la lectura (temperatura) del termómetro. Esta temperatura se conoce como de «bulbo húmedo» (bh). Si el aire estuviese saturado con humedad (100% hr), la lectura de la temperatura en el termómetro de bulbo húmedo, sería la misma que la del termómetro de bulbo seco. Sin embargo, la hr normalmente es menor de 100% y el aire está parcialmente seco, por lo que algo de la humedad de la mecha se evapora hacia el aire [20].

TEMPERATURA DE BULBO SECO [°C]: La temperatura del aire indicada es normalmente la temperatura de «bulbo seco» (bs), tomada con el elemento sensor del termómetro en una condición seca, se refiere a la temperatura del aire, sin tener en cuenta la radiación calorífica de los objetos que rodean ese ambiente concreto, y de los efectos de la humedad relativa y de los movimientos de aire. Puede ser medida por termómetros ordinarios en casa [20].

TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO [°C] Es otra propiedad de aire incluida en una carta psicrométrica. Esta es la temperatura a la cual se condensará la humedad sobre una superficie [20].

VELOCIDAD DEL VIENTO [m/s] Se refiere a la velocidad a la que el aire se mueve y puede medirse con distintos tipos de anemómetros o termo-anemómetros [42].

Referencias Bibliográficas

- [1] "Aislante." Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [2] "Albedo." Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [3] F. C. Cala González y C. A. Rodríguez Sanudo, Diseño de un sistema de suministro de energía eléctrica con tecnología solar fotovoltaica, Bucaramanga, Dirigido por Ph.D. Gerardo Latorre Bayona: Universidad Industrial de Santander, Trabajo de investigación de Pregrado, 2010, Disponible en <http://tangara.uis.edu.co/bibliow>.
- [4] [En línea]. Available: http://www.autodesk.es/adsk/servlet/index?siteID=455755&id=10200355&DCMP=DMC-BIM_ES_DM.
- [5] "CAD/CAM." Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [6] Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=21973>. (Consultada en Julio 2012).
- [7] "Techo." Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [8] Disponible en: <http://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/Paginas/Manualventanas.html>. (Consultada en Julio 2012).
- [9] Wikipedia: La enciclopedia libre, «Bomba de Calor - COP (Térmico),» 08 Abril 2012. [En línea]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/COP_\(t%C3%A9rmico\)#Rendimiento](http://es.wikipedia.org/wiki/COP_(t%C3%A9rmico)#Rendimiento). [Último acceso: 19 Mayo 2012].
- [10] Department of Energy (DOE). Energy-Efficient Air Conditioners: New Standards coming in 2006. 2005. [En Línea] Disponible en: http://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/residential/pdfs/ac_factsheet.pdf.
- [11] Ecoxline, Inc., «Ecox Info - Technical Information Bulletin No. E004SP,» [En línea]. Available: <http://www.galpaexport.com/pan/descargas/46.pdf>. [Último acceso: 2012 Mayo 19].
- [12] "Extensión." Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [13] Disponible en: http://www.stee-eilas.org/dok/arloak/lan_osasuna/udakoikas/acust/acus4.pdf. (Consultado en Julio 2012).

- [14] Disponible en :http://cumincades.scix.net/data/works/att/sigradi2003_066.content.pdf. (Consultado en Mayo 2012).
- [15] Disponible en :<http://www.cricyt.edu.ar/secprensa/siacot/cdenlinea/ponencias/comision4/Esteves,%20Alfredo/PO-Esteves%20y%20otros.pdf>. (Consultado en Mayo 2012).
- [16] Disponible en: Norma disponible en http://ntm.ru/UserFiles/File/document/Mikroklimat/Norm/ISO_7730_2005.pdf. (Consultado en Enero 2012).
- [17] Ministerio de minas y energía de Colombia, RETILAP: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, Bogotá, D.C.: República de Colombia, 2010.
- [18] Disponible en: http://www.javeriana.edu.co/arquidis/educacion_continua/documents/PRES.RADIACIONESOLAR1.pdf. (Consultada en Junio 2012).
- [19] Construmática: La Construpedia, «Cartas Bioclimáticas,» [En línea]. Available: http://www.construmatica.com/construpedia/Cartas_Bioclim%C3%A1ticas. [Último acceso: 09 06 2012].
- [20] EMERSON TM Climate Technologies, MANUAL TECNICO VALYCONTROL, México DF, 2008. [En Línea] Disponible en: http://www.emersonclimatemexico.com/literatura_mt.htm.
- [21] Disponible en:http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/SAN_JUAN/676/eolica_y_molinos/capitulo_1/cap_1_3.htm. (Consultada en Junio 2012).
- [22] Disponible en:http://pyarq.obraencurso.es/elementos_constructivos. (Consultada en Junio 2012).
- [23] Diccionarios de Encarta. Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [24] Disponible en:http://pyarq.obraencurso.es/elementos_constructivos. (Consultada en Mayo 2012).
- [25] Disponible en :[http://materias.fi.uba.ar/6732/pdf/67\[1\].32_01-Balance%20termico%20Aire%20Acondicionado.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6732/pdf/67[1].32_01-Balance%20termico%20Aire%20Acondicionado.pdf). (Consultado en Mayo 2012).
- [26] Disponible en: [http://materias.fi.uba.ar/6732/pdf/67\[1\].32_01-Balance%20termico%20Aire%20Acondicionado.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6732/pdf/67[1].32_01-Balance%20termico%20Aire%20Acondicionado.pdf). (Consultado en Mayo 2012).
- [27] "Software." Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [28] "Humedad." Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [29] Disponible en:http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10055_GT_aprovechamiento_luz_natural_05_ff12ae5a.pdf.(Consultado en Mayo 2012).
- [30] Disponible en:<http://www.sol-arq.com/index.php/caracteristicas-materiales/masa-termica>. (Coconsultado en Mayo 2012).
- [31] Disponible en:<https://sites.google.com/site/pjruizararquitecturabioclimatica/herramientas-de-diseno/mascaras-de-sombra>. (Consultado en Mayo 2012).
- [32] "Microclima." Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.

- [33] Disponible en: <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen9/integracion.pdf>. (Consultada en Mayo 2012).
- [34] Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6104/07CAPITULO2.pdf?sequence=7>. (Consultada en Junio 2012).
- [35] Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6104/07CAPITULO2.pdf?sequence=7>. (Consultada en Junio 2012).
- [36] Disponible en: http://agr.unne.edu.ar/Materias/Agroclima/Presion_atmosferica.pdf. (Consultada en Mayo 2012).
- [37] Disponible en: <http://www.unalmed.edu.co/~cpgarcia/termicas.PDF>. (Consultada en Mayo 2012).
- [38] Disponible en: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi97/imagen/espinal/radiacin.htm>. (Consultada en Mayo 2012).
- [39] Disponible en: <http://quechua.fis.uncor.edu/esp2/clases/node60.html>. (Consultado en Mayo 2012).
- [40] Disponible en: <http://www.hanseata.es/downloads/articulos-tecnicos/Articulo-CLIMA-TEMPERATURA-Y-HUMEDAD.pdf>. (Consultado en Mayo 2012).
- [41] Disponible en: http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2009/cf-cronembold_sl/pdfAmont/cf-cronembold_sl.pdf. (Disponible en Mayo 2012).
- [42] Disponible en: http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/SAN_JUAN/676/eolica_y_molinos/capitulo_1/cap_1_2.htm. (Consultada en Mayo 2012).

ANEXO B. Cálculo de los índices PMV y PPD

Los índices PMV y PPD son modelos matemáticos de la psicología térmica humana, calibrados a partir de las sensaciones de calor reportados por las persona durante experimentos en espacios con clima controlado [1].

Estos índices no siempre coinciden con las sensaciones que reportan las personas en circunstancias de la vida diaria. Las razones para estas diferencias son diversas y no se comprenden del todo. En general, las personas se encuentran más tolerantes a la diversidad en circunstancias ordinarias que lo predicho con el modelo PMV/PPD [1].

Las discrepancias más significativas ocurren cuando la temperatura interna es cálida y la exterior es más alta. El PMV predice que las personas estarían más acaloradas de lo que se ha encontrado en la práctica; en estas circunstancias se prefieren los resultados empíricos que los estudios de campo [1].

1. Voto Medio Previsto (*Predicted mean vote - PMV*)

El índice PMV considera la influencia de la temperatura del aire, temperatura media radiante, movimiento del aire, humedad, ropa y el nivel de actividad, en un valor dentro de la escala de sensación térmica de ASHRAE que aparece en la Tabla B.1. A partir de este índice se busca predecir la respuesta media de un grupo de personas considerando que están expuestos al mismo ambiente, con ropa y actividad idéntica [1].

Valor del índices	Sensación térmica
3	Calor
2	Cálido
1	Ligeramente cálido
0	Neutral
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

Tabla B.1. Escala de sensación térmicas – ASHRAE [1].

Si bien este índice se puede aplicar para cualquier cantidad de usuarios, es cierto que un número reducido de encuestados no será suficiente para que los resultados sean válidos estadísticamente, pero es posible darse una idea de que un ambiente teóricamente confortable, tanto desde el punto de vista del cálculo del sistema de climatización como desde el punto de vista del cálculo del confort basado en el modelo PMV, puede llegar a ser percibido realmente por los usuarios como un ambiente inconfortable [2].

Fanger (1970) relacionó el PMV con el desbalance entre el flujo de calor real que sale del cuerpo en un ambiente dado, y el flujo de calor requerido para un confort óptimo al realizar una actividad específica mediante las ecuaciones especificadas la norma BS EN ISO 7730, que se presentan a continuación:

$$PMV = (0.303 e^{-0.036M} + 0.028) \{ (M - W) - 0.00305 [5733 - 6.99(M - W) - p_s] - 0.42[M - W - 58.15] - (1.7 \times 10^{-5})M(5867 - p_s) - 0.0014M(34 - \theta_{ai}) - (3.96 \times 10^{-8})f_{cl} [(\theta_{cl} + 273)^4 - (\theta_c + 273)^4] - [f_{cl}h_c(\theta_{cl} - \theta_{ai})] \} \quad (Ec. B.1)$$

Donde:

PMV: Voto Medio Previsto

M: tasa metabólica (W/m^2 de superficie corporal)

W: trabajo externo (W/m^2 de superficie corporal); es igual a cero (0) para la mayoría de actividades.

f_{cl} : Proporción entre el área del cuerpo humano cubierta por ropa y el área sin ropa

θ_{ai} : Temperatura promedio del aire que rodea el cuerpo ($^{\circ}C$).

θ_c : Temperatura operativa ($^{\circ}C$)

p_s : Presión parcial del vapor de agua en el aire que rodea el cuerpo (Pa)

h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie corporal ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

θ_{cl} : Temperatura superficial de la ropa ($^{\circ}C$)

La temperatura superficial de la ropa (θ_{cl}) está dada por:

$$\theta_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{ (3.96 \times 10^{-8}) \times f_{cl} [(\theta_{cl} + 273)^4] + f_{cl} h_c (\theta_{cl} - \theta_{ai}) \} \quad (Ec. B.2)$$

Siendo:

I_{cl} : Resistencia térmica de la ropa ($m^2 \cdot K/W$).

La proporción entre el área del cuerpo humano cubierta por ropa y el área sin ropa (f_{cl}) se calcula de acuerdo:

$$f_{cl} = 1 + 1.29 I_{cl}; \text{ si } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \text{ (Ec. B.3)}$$

$$f_{cl} = 1.05 + 0.645 I_{cl}; \text{ si } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \text{ (Ec. B.4)}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie corporal ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) será:

$$\text{Si } 2.38 (\theta_{cl} - \theta_{ai})^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_r}, \quad h_c = 2.38 (\theta_{cl} - \theta_{ai})^{0.25} \text{ (Ec. B.5)}$$

$$\text{Si } 2.38 (\theta_{cl} - \theta_{ai})^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_r}, \quad h_c = 12.1 \sqrt{v_r} \text{ (Ec. B.6)}$$

Donde v_r es la velocidad relativa del aire.

2. Porcentaje de no satisfacción (*Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD*)

Las personas son térmicamente diferentes; cuando se somete a un grupo de personas al mismo ambiente, normalmente no será posible satisfacer a todos a la vez; el objetivo es, por lo tanto, crear un confort térmico óptimo para todo el grupo; por ejemplo, una condición en la que el porcentaje más alto posible del grupo se sienta térmicamente cómodo [1].

Como los votos individuales de sensación térmica se dispersan alrededor del valor de la media predicha (PMV), es útil predecir también el porcentaje de personas que no estarán satisfechas, tomándolas como aquellas que votarían con un valor de sensación térmica mayor que uno (>1) o menor que menos 1 (<-1) de acuerdo a la escala de sensación. El porcentaje predicho de no satisfacción (PPD) busca conocer esto y se obtiene a partir de la PMV usando la siguiente ecuación:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] \text{ (Ec. B.7)}$$

Referencias Bibliográficas

- [1] A. N. F. - C. W. Marsh, Human Comfort, [En línea] Disponible en: http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Human_Comfort.
- [2] F. J. Chávez del Valle, Zona variable de confort térmico, Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Construccions Arquitectòniques I, 2002.

ANEXO C. Métodos para establecer franja de confort térmico

En este anexo se describen los métodos que puede considerar *Autodesk Ecotect Analysis* para establecer la franja de confort: plana, temperatura de neutralidad térmica, adaptativo con ventilación natural o sistema desconocido. También se dan detalles sobre las condiciones en que se desarrollaron los estudios a partir de los que se obtuvo cada modelo, con el fin de seleccionar el que se ajuste mejor a las condiciones de operación del EEEIE.

1. Franja de confort plana - Flat Comfort Band

Este método usa la temperatura máxima y mínima de la franja de confort de cada zona. Si la temperatura interna de la zona se encuentra por fuera de la franja de confort establecida, se considera que no es comfortable.

El valor estándar de la franja de confort es de 21°C - 24°C para zonas con aire acondicionado, pero cuando el edificio cuenta con ventilación natural se deben considerar las condiciones ambientales específicas para definir los límites de la zona de confort.

Dependiendo de la ropa, la temperatura media radiante y el movimiento del aire una persona se puede sentir comfortable en temperaturas de más de 30°C. Por esta razón se recomienda realizar pruebas en el la ubicación del edificio para definir la franja de confort considerada para el diseño.

Andrew Marsh, autor de *Autodesk Ecotect Analysis*, recomienda usar un rango de temperaturas de 18°C a 28°C para edificios bajo climas cálidos y un rango de 20°C a 26°C en climas relativamente fríos.

2. Neutralidad térmica

La temperatura de neutralidad térmica (T_n) se refiere a la temperatura del aire a la que la mayoría de personas no sentirían calor ni frío [1]. Esta temperatura considera las temperaturas de bulbo seco del lugar en que se encuentra el edificio, y las expectativas térmicas de las personas [2]. Varios autores como Fanger (1970), Auliciems (1981), Schiller (1988); de Dear et al. (2001), Brager(2001), Nicol (1997) y Raja (1997), afirman que el método de la neutralidad térmica es apropiado para el desarrollo de un modelo de confort [3].

La expectativa térmica de las personas es la temperatura que esperan sentir de acuerdo a la época del año y su ubicación. Las expectativas térmicas son mayores en verano que en invierno, y por esto las temperaturas requeridas para lograr el confort son mayores en verano [2]. En la Figura C.1 se muestra la diferencia en la temperatura de neutralidad térmica entre Atenas y Londres con el fin de notar su variación con la ubicación y la época del año.

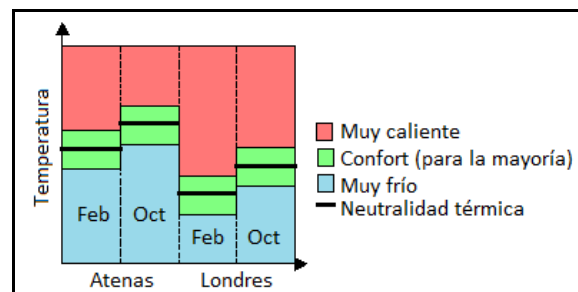


Figura C.1. Temperatura de neutralidad térmica en Atenas y Londres – Febrero, Octubre.

Debido a que la temperatura de neutralidad térmica depende de la ubicación geográfica, se puede definir a partir de varios modelos [2]. Estos se determinan realizando mediciones subjetivas a partir de encuestas que contienen la información diagnóstica del usuario promedio, por medio de preguntas que se refieren a aspectos psicológicos, fisiológicos y físicos del usuario respecto del ambiente térmico que lo rodea [3]. *Autodesk Ecotect Analysis* usa el modelo desarrollado por Auliciems en 1981 [1].

Auliciens desarrolló su modelo a partir de estudios de confort en edificaciones en Australia, con el objetivo de ajustar los controles de aires acondicionados para hacerlos adaptativos, dependiendo del clima exterior [2]. Mediante experimentos encontró una correlación entre la temperatura de neutralidad térmica (T_n) y la temperatura de bulbo seco promedio exterior ($T_{o.ave}$) [1] [2] [4]. Esta relación está dada por la Ecuación C.1.

$$T_n = 17,6 + 0,31 T_{o.ave} \quad (\text{Ec. C.1})$$

El modelo de Auliciens fue corroborado por de Dear et al. (1997), con la realización de un estudio en el que consideró un gran número de personas [4]. Se obtuvo un modelo muy similar al de Auliciens, el cual aparece en la Ecuación C.2.

$$T_n = 17,8 + 0,31 T_{o.ave} \quad (\text{Ec. C.2})$$

Autodesk Ecotect Analysis considera una franja de confort de 1,75°C alrededor de la temperatura de neutralidad térmica media mensual, que en la Figura C.1 corresponde a la franja de color verde [1]. Esta franja es la recomendada por Auliciens y Szokolay (1997) cuando el periodo de adaptación es mensual o menor. Ellos plantean que el rango de confort depende del tiempo de adaptación que tienen las personas en sus ambientes, por lo que en cuanto mayor sea ese periodo, más fácilmente podrán asimilarse cambios sin que se reduzca significativamente la sensación de confort.

Así, las temperaturas (T) que se encuentran dentro de la franja de confort son aquellas dentro del rango establecido en la Ecuación C.3.

$$15.85 + 0,31 T_{ave} < T < 19.35 + 0,31 T_{ave} \quad (\text{Ec. C.3})$$

3. Confort adaptativo con ventilación natural

Los modelos de confort adaptativos asumen que, si ocurren cambios en el ambiente térmico que producen disconfort, las personas cambiarán su

comportamiento. Tales cambios pueden incluir quitarse la ropa, reducir los niveles de actividad o abrir una ventana. El principal efecto de los modelos adaptativos es incrementar el rango de condiciones que los diseñadores consideran confortables, especialmente en edificaciones naturalmente ventiladas donde los ocupantes tienen un elevado grado de control sobre su ambiente térmico [1].

El método de confort adaptativo con ventilación natural fue el primer intento de determinar la temperatura de neutralidad en la cual las personas no sientan ni calor ni frío [2]. En este modelo se asume que las personas toman medidas para hacer frente a las variaciones de temperatura en un edificio con ventilación natural [1].

Michael Humphreys, determinó el modelo en 1978 examinando un gran número de estudios de confort en edificios sin refrigeración mecánica [2]. Este método usa la temperatura media exterior mensual ($T_{o,ave}$) para determinar la temperatura óptima o de neutralidad (T_{conf}) [4]. En la Figura C.2 se grafica la relación entre estas temperaturas [2].

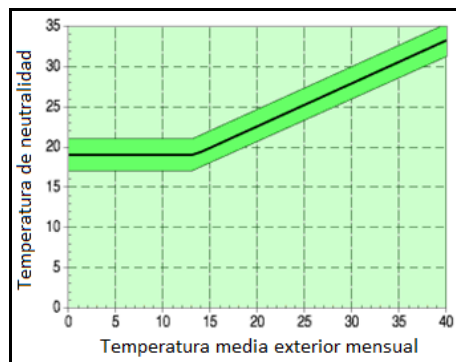


Figura C.2. Relación entre la temperatura media exterior mensual y la temperatura de neutralidad - Modelo de Humphrey

La temperatura de neutralidad considerada en el método de confort adaptativo con ventilación natural está dada por la Ecuación C.4 [1] [2] [4].

$$T_{conf} = 11.9 + 0.534T_{o,ave} \quad (\text{Ec. C.4})$$

A pesar de que la temperatura de neutralidad es propia de cada ubicación, por la gran cantidad de estudios usados para obtener el método de confort adaptativo,

este modelo permite estimar un valor adecuado para edificios con ventilación natural en cualquier ubicación, y se considera una guía universal [2].

El rango de temperaturas de confort se define como 1,75°C por encima y por debajo de la temperatura de neutralidad, de manera que la franja de confort se define de acuerdo a la Ecuación C.5.

$$10.15 + 0.534 T_{o,ave} < T_{conf} < 13.65 + 0.534 T_{o,ave} \quad (Ec. C.5)$$

NOTA: *Autodesk Ecotect Analysis* sólo realiza el cálculo de confort adaptativo con ventilación natural cuando el edificio no tiene aire acondicionado ni calefacción. En caso contrario, se calculan las cargas de calefacción y refrigeración.

4. Confort adaptativo: Sistema Desconocido (Promedio de todos los tipos de edificios)

Este método también es de tipo adaptativo, y en él se considera que en la edificación se usa la ventilación natural y estrategias de acondicionamiento mecánicas para controlar las condiciones de confort [5]. El modelo fue planteado por Humphreys y Nicol (1998), para hallar la temperatura de neutralidad (T_n) a partir de la temperatura exterior media mensual ($T_{o,ave}$).

El modelo se basa en datos tomados a partir de un amplio rango de edificios, climas y culturas, por lo que resulta útil cuando no se tiene un modelo que se ajuste bien a las características del edificio [56]. La temperatura de neutralidad térmica para un sistema desconocido se calcula a partir de la Ecuación C.6.

$$T_{conf} = 24.2 + 0.43(T_{ave} - 22) \cdot e^{-\left(\frac{T_{ave}-22}{28.284}\right)^2} \quad (Ec. C.6)$$

El rango de temperaturas de confort se también se define 1.75°C por encima y por debajo de la temperatura de neutralidad. La franja de confort se define de acuerdo a la Ecuación C.7.

$$22.45 + 0.43(T_{\text{ave}} - 22) \cdot e^{-\left(\frac{T_{\text{ave}}-22}{28.284}\right)^2} \leq T \leq 25.92 + 0.43(T_{\text{ave}} - 22) \cdot e^{-\left(\frac{T_{\text{ave}}-22}{28.284}\right)^2} \quad (\text{Ec. C.7})$$

NOTA: *Autodesk Ecotect Analysis* sólo realiza el cálculo de confort de un sistema desconocido cuando el edificio no tiene aire acondicionado ni calefacción. En caso contrario, se calculan las cargas de calefacción y refrigeración.

Referencias Bibliográficas

- [1] Marsh, Andrew; Autodesk Inc. Help Ecotect 2011. 2010.
- [2] Low energy and solar solutions. Defining thermal confort. [En línea] Disponible en: www.l-e-s-s.co.uk/Guides/ThermalComfort/DefiningComfort.htm. Fecha de consulta: Mayo 11 de 2012.
- [3] Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. Predicción del índice de disconformidad térmica en espacios de oficina considerando el diagnóstico de usuarios. 2009. Disponible en: www.cricyt.edu.ar/lahv/asades/modulos/averma/trabajos/2009.
- [4] Szokolay, Steven V. Introduction to architectural science: The basis of sustainable design. Elsevier Ltd. Segunda edición. Oxford. 2008 .
- [5] Aidyn Hezer, Nevin. The efect of construction materials on thermal confort in residential buildings. Disponible en: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/4/1104645/index.pdf>. Fecha de consulta: Mayo 11 de 2012..
- [6] ASHRAE. ASHRAE Fundamentals: Thermal confort. 2009.

ANEXO D. Condiciones de operación de una zona

Los parámetros que definen las condiciones de operación de una zona térmica, se definen en el desarrollo de este anexo, y se clasifican en condiciones internas de diseño, ocupación, ganancias internas, tasa de intercambio de aire y el tipo de sistema de climatización.

Es importante conocer los parámetros que hacen parte de las condiciones de operación, ya que el software *Autodesk Ecotect Analysis* cuenta con el asistente para administración de zonas, donde se deben definir cuantitativamente y cualitativamente cada uno de ellos.

Tabla D.1. Condiciones internas de diseño

Parámetro	Detalle
Ropa [clo]	Define el efecto térmico de la ropa que usan los ocupantes mediante un valor proporcional a la ganancia térmica que produce. Se asigna un valor a la ropa que se espera usen los ocupantes, ya que incide en la temperatura percibida.
Humedad [%]	Se especifica la humedad que se espera mantener en la zona con el fin de que sus ocupantes se sientan a gusto.
Velocidad del aire [m/s]	Velocidad del aire que se desea mantener.
Nivel de iluminación [lux]	El nivel de iluminación ideal para las tareas que se realizan en la zona. Se usa para los cálculos de iluminación natural y artificial.

Tabla D.2. Ocupación

Parámetro	Detalle
Número de personas	Es el máximo número de personas que pueden estar en la zona. Este valor se usa durante los cálculos de ganancia interna para estimar el aporte debido a la ocupación, ya que es el escenario más pesimista.
Actividad [W]	Actividad para la cual se diseña la zona según la potencia que gastará cada ocupante para ejecutarla. A partir de ella, se cuantifica el aumento de temperatura que se produce por la liberación de calor al realizar una actividad.
Horario	Se asigna un porcentaje de ocupantes durante cada hora en el año.

Tabla D.3. Ganancias internas

Parámetro	Detalle
Ganancia sensible [W/m ²]	Especifica las ganancias internas de calor en la zona, adicionales al calor producido por los elementos creados específicamente en el modelo, debido a iluminación y equipos. Está dada por unidad de área de piso.
Ganancia latente [W/m ²]	Se refiere a las ganancias debidas a la humedad presente en el aire. Ocurren cuando el cuerpo suda, se cocina comida o en los procesos de algunos equipos. El valor se da por metro cuadrado de superficie del piso.
Horario	Se define el horario durante el cual se presentarán las condiciones que propician la aparición de estas ganancias.

Tabla D.4. Tasa de intercambio de aire

Parámetro	Detalle
Tasa de renovaciones de aire [renovaciones de aire/hora]	Es la cantidad de aire fuga en la zona, dada en renovaciones de aire por hora, incluso cuando las puertas y ventanas están cerradas. Una renovación de aire equivale al volumen de aire de la zona. El valor para construcciones típicas cerradas herméticamente está entre 0,5-1,0. Es un valor del ambiente independiente de los efectos de las ventanas y otras aperturas.
Sensibilidad del aire [renovaciones de aire/hora]	Este es un valor adicional de la tasa del intercambio de aire. Representa la sensibilidad de la zona a la velocidad externa del viento. Se calcula multiplicando la velocidad del viento por hora (m/s) y el factor del terreno especificado para el edificio.
Horario	Tiempo en el que se van a considerar los parámetros de infiltración definidos

Tabla D.5. Tipo de sistema de climatización

Parámetro	Detalle
Tipo de sistema	Se define el tipo de sistema pasivo o de aire acondicionado usado en la zona. Cuando se selecciona el modo combinado o sistema de aire acondicionado las temperaturas internas se mantendrán entre el límite inferior y superior especificado en el termostato.
Eficiencia	Representa la eficiencia de la planta de aire acondicionado. Se usa al calcular los costos de energía.
Horario de operación	Se define el tiempo de encendido o de apagado del sistema. Puede definirse uno para los días entre semana y otro para los fines de semana, ó un horario en el que se distinga cada día del año.

ANEXO E. Características de los espacios interiores

Este anexo tiene como finalidad mostrar las variables que se van a considerar en la selección de los espacios interiores, cada uno de estos parámetros tienen influencia directa en los consumos energéticos de las edificaciones.

El procedimiento es sencillo, por cada espacio interior se debe ubicar el nivel, la fachada, es decir, todas las variables se encuentran en la Tabla E.1.

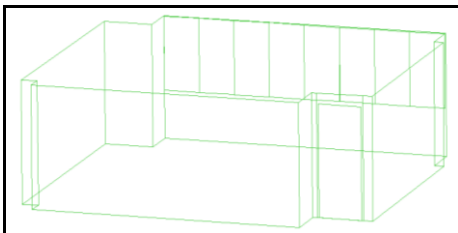
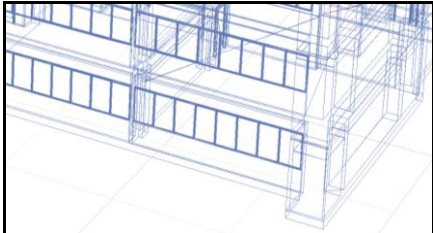
Tabla E.1 Variables de datos

Nivel	Ubicación de la zona
Zona	Nombre con el que se denomina.
Fachada	Ubicación de la zona dentro del edificio
Área	Dimensionamiento en m ²
Ubicación de ventanas	Según la fachada
Tiempo de uso	[h/semana]
Ocupación	(Máx # personas)
Número de lámparas	
Aire Acondicionado	Existencia
Equipos	Ejemplo: Videobeam, telón,
	# computadores y consumo de potencia
Actividad / Descripción	Tipo de actividades realizadas dentro de la zona

Es de mencionar que estas variables se desean recolectar, a fin de determinar los espacios interiores más críticos de la edificación; sin embargo, puede que se contemplen un mayor o menor número de parámetros en modelos de edificaciones diferentes a el EEEIE.

ANEXO F. Descripción de los formatos de importación del modelo geométrico de una edificación a *Autodesk Ecotect Analysis* [1]

A continuación en Tabla F.1 se exponen los dos formatos en que se puede importar la información geométrica de una edificación a *Autodesk Ecotect Analysis*. En la tabla se compara la importación de zonas térmicas y la geométrica, teniendo en cuenta las ventajas, desventajas y simulaciones que permite hacer cada una.

	Importación de zonas térmicas (.gbXML)	Importación geométrica (.3ds)
Descripción	El edificio no se modela como un todo, sino que se define cada uno de los salones o habitaciones que lo conforma como un espacio cerrado que se conoce como zona. Sólo se importa la información necesaria para analizar el desempeño del edificio mediante una representación simplificada, que contiene toda la información sobre cada cuarto como su volumen, materiales y adyacencia con las demás zonas definidas.	Se genera un modelo basado en superficies que incluye toda la información relacionada con la forma del edificio, pero no distingue los materiales de los elementos ni su naturaleza.
Imagen de la importación		
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - El modelo es más sencillo de manejar, porque está simplificado. - Contiene la información necesaria para realizar la mayoría de los análisis. - Al importar el modelo, los materiales se asignan de acuerdo al tipo de elemento definido en el modelo original. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contiene más detalles del modelo en cuanto a la forma física y estructura del edificio, así como de otros elementos que pueden ser necesarios para algunos análisis.
Desventajas	<p>No es conveniente usarlo en los análisis que requieren un alto grado de detalle en cuanto a la estructura del edificio, especialmente cuando se tienen muros curvos, arcos y otras estructuras complejas. Si bien se pueden realizar los análisis, los resultados no son exactos por el bajo nivel de detalle considerado.</p> <p>Este es el caso del análisis detallado de sombras.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Los materiales se asignan durante la importación de acuerdo a la posición de las caras y no de acuerdo a los tipos de elementos. - Se debe realizar una limpieza al modelo para eliminar las superficies triangulares²⁵, antes de asignar materiales. - El proceso de asignación de materiales se debe hacer a cada superficie que forma el modelo. - La gran cantidad de planos que forman el modelo implica que el archivo sea de mayor tamaño que el de zonas térmicas; por lo cual, se requiere una mayor capacidad de cómputo.

²⁵ En la geometría computacional, las superficies de objetos sólidos se representan como aproximaciones discretas que son conformadas por un conjunto de vértices y caras triangulares. En *Autodesk Ecotect Analysis* las superficies triangulares son innecesarias, y aumentan el tamaño (kB) del modelo, requiriendo más tiempo para hacer simulaciones.

Simulaciones en las que se recomienda su uso	<p>Este formato de importación es conveniente para realizar las simulaciones de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Acústica - Iluminación artificial - Estimativo de costos - Envolverte solar - Iluminación diaria - Análisis solar - Potencial fotovoltaico - Análisis térmico y energético - Cargas y huella de carbono - Uso de recursos (agua, electricidad, gas) - Sombras y ventilación (cuando el edificio no es muy complejo, o el nivel de precisión requerido no es tan alto) 	<p>Este formato de importación es conveniente para realizar las simulaciones que requieren gran detalle de la estructura arquitectónica del edificio como:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sombras y ventilación (cuando los detalles estructurales del edificio son muy) - Radiación solar incidente cuando las superficies pueden reflejar rayos y crear áreas sobre o subexpuestas.
	<p>NOTA: Muchas de estas simulaciones se pueden realizar con cualquiera de los formatos, pero la recomendación se basa en que adecuar y manejar el modelo al importarlo como zonas térmicas es más sencillo.</p>	

Tabla F.1. Comparación de los formatos de importación (gbXML) y (.3ds).

Referencia Bibliografía

- [1] Graphisoft R&D Zrt. Reference Manual: Preparing ArchiCAD Models for Analysis in Ecotect. 2008. [En línea] Disponible en: http://download.graphisoft.com/ftp/download/ecotect/ArchiCAD_Model_Preparation_for_Ecotect.pdf.

ANEXO G. Modificaciones y simplificaciones realizadas al modelo geométrico del EEEIE

Como se mencionó previamente, algunos detalles del EEEIE no se consideraron con exactitud, debido a que no afectan significativamente los resultados de los análisis térmicos y lumínicos, y si tendrían un alto costo en tiempo y recurso computacional. En la Tabla G.1 se indican los cambios realizados al BIM del EEEIE respecto al edificio real, y su justificación.

Tabla G.1. Modificaciones al modelo geométrico del EEEIE.

ELEMENTO	EDIFICIO REAL	MODELO	JUSTIFICACIÓN
COLUMNAS	Esta formada por armadura de acero y concreto 3000 psi	Las columnas principales, que se encuentran hacia el exterior del edificio son de concreto, pero las que se encuentran hacia el interior de los salones no fueron consideradas.	Las columnas hacia el interior del edificio son mucho más pequeñas que las externas y ocupan un área pequeña de las aulas, comparada con la que ocupan los muros.
MUROS DEL AUDITORIO CAMACHO CARO	El auditorio cuenta con muros curvos con el fin de mejorar sus características acústicas.	La curvatura de los muros se aproximó mediante segmentos de muros rectos.	Al importar una superficie curva se genera un gran número de superficies planas, que aumentan los recursos de memoria usados por el modelo y, a su vez, disminuyen la velocidad en las simulaciones.
ZONA	Algunas aulas tienen separaciones modulares, como es el caso del Salón de profesores cátedra.	Una sola zona	Se realizó de esta manera porque los separadores que tienen las zonas pequeñas, no interfieren en los efectos térmicos y es probable que actúen como un solo volumen de aire.
EDIFICIOS ADYACENTES	El EEEIE es adyacente a la casona La Perla, Instituto de Lenguas, Edificio Mamitza Bayer y al Edificio de Ingeniería eléctrica.	Los edificios adyacentes se simularon a partir de volúmenes similares en dimensiones, pero sin entrar en detalles constructivos como ventanales.	La mayor influencia que ejercen estos edificios sobre el edificio de interés es en cuanto a la forma en que reflejan u obstruyen la radiación solar. Los factores más importantes para cuantificar estos efectos son las dimensiones (sin necesidad de entrar en mucho detalle) y las características de los materiales sobre los que inciden los rayos solares. Estas últimas se definen considerando los aumentos o disminuciones que se presentan de acuerdo al porcentaje de ventanas de cada edificio.

ANEXO H. Correcciones realizadas al modelo importado desde *Graphisoft ArchiCAD*

Debido a que *Autodesk Ecotect Analysis* no interpreta correctamente parte de la información contenida en el modelo del EEEIE creado en *Graphisoft ArchiCAD*, se debieron corregir algunos elementos. A continuación en la Tabla H.1 se describen los inconvenientes que se presentaron al importar el modelo y las medidas tomadas para solucionarlos.

Tabla H.1. Correcciones realizadas al modelo importado desde *Graphisoft ArchiCAD*

Elemento	Inconveniente	Solución
Ventanas/Puertas	Estos elementos aparecen fuera de los muros (Ver Figura 3.4).	Se debe indicar manualmente a qué muro pertenece cada elemento.
	Para indicar que un objeto está compartido entre dos zonas, éste debe aparecer en cada una, pero el modelo creado en <i>Graphisoft ArchiCAD</i> no lo tiene en cuenta en todos los casos.	Se tuvo que verificar la existencia de cada puerta y cada ventana en ambas zonas y de su respectiva creación en caso de que no existiera en ambas zonas.
Huecos o vacíos	Estos elementos ubicados en las escaleras o los pasillos que tienen comunicación con el exterior y permiten el paso libre del aire entre zonas, no son importados desde <i>Graphisoft ArchiCAD</i> .	Se deben crear manualmente en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> mediante elementos de vacío (Void) pertenecientes a la pared o piso en que se encuentran.
Escaleras	Al crear las zonas térmicas no se distinguen las escaleras, ya que la zona sólo representa los espacios de aire, pero no detecta los objetos que se encuentran dentro de ellas.	Se crearon en <i>Google SketchUp</i> para importarlas directamente a <i>Ecotect</i> y ubicarlas dentro de la zona correspondiente (Ver Figura 3.5) Se deben definir como zonas adiabáticas (particiones), para indicar que no habrá intercambio térmico entre las escaleras y la zona a la que pertenecen.
Cortasoles	Los cortasoles del EEEIE son curvos, por lo cual su modelado en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> o en <i>Graphisoft ArchiCAD</i> es complicado.	Se crearon con <i>Google SketchUp</i> que permite hacerlos rápidamente, y al importarlos a <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> se reconocen bien. Se puede crear un solo cortasol tipo, y replicarlo directamente en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> con la función <i>Duplicate</i> (ctrl+D). Los materiales se asignaron directamente en <i>Autodesk Ecotect Analysis</i> .

ANEXO I. Descripción de materiales usados en el modelo del EEEIE

En la Tabla I.1 Tabla I.1 se describen los materiales usados para representar los efectos térmicos de cada elemento. En esta se enlistan los elementos según las especificaciones técnicas publicadas por la UIS, los materiales con los que se representaron en *Autodesk Ecotect Analysis*, sus características térmicas y algunos comentarios sobre la estructura de los elementos que se manejaron en el modelo.

Tabla I.1. Descripción de los materiales del modelo del EEEIE

Elemento	Composición según especificaciones técnicas	Materiales sencillos	W [mm]	D [kg/m ³]	SH [J/kg.K]	C [W/m.K]	Comentarios
Muros internos	1- Ladrillos de arcilla estructurales (de acuerdo a la norma ASTM-67) 2- Friso de 1,5 cm: cemento y arena (1:3)+ agua+ aditivo adherente tipo Sika Látex o equivalente 3- Estuco: mezcla de yeso, cal y cemento 4- Pintura blanca	<i>Plaster Building (Molded Dry)</i>	2	1 250	1 088	0,43	Estos muros se componen por ladrillos de arcilla en el centro, y un recubrimiento de friso y estuco en la cara interna y externa del muro. La capa de pintura no se incluyó por su bajo efecto térmico al ser una capa tan delgada. El efecto de la pintura se consideró al asignar el color del muro. // Material: muros_internos NOTA: En el caso de los muros con un grosor diferente a 20 cm se creó un elemento compuesto de los mismos materiales, pero con el grosor del ladrillo diferente.
		<i>Cement Plaster, Sand Aggregate</i>	3	1 860	840	0,72	
		<i>Brick, Heavyweight</i>	150	1 650	840	0,81	
Escaleras	1- Concreto de 3500 PSI 2- Gravilla lavada No. 2 1/2, pulida	<i>Concrete</i>	100	3 800	657	0,34	// Material: concreto
		<i>Concrete Screed</i>	5	2 000	659	0,75	
		<i>Ceramic Tiles</i>	10	1 900	657	0,31	
Muros externos	1- Ladrillos de arcilla estructurales (de acuerdo a la norma ASTM-67) 2- Friso de 1,5 cm: cemento y arena lavada (1:3)+ agua potable+ impermeabilizante integral tipo Sika 1 o equivalente 3- Estuco plastico: mezcla de yeso, cal y cemento 4- Pintura blanca	<i>Plaster Building (Molded Dry)</i>	2	1 250	1 088	0,43	Debido a que los materiales de los muros internos y externos son muy similares, se manejó un solo material para ambos. //Material: muros_internos
		<i>Cement Plaster, Sand Aggregate</i>	3	1 860	840	0,72	
		<i>Brick, Heavyweight</i>	150	1 650	840	0,81	
Placas entre pisos	1-Concreto, 30 cm 2- Baldosas en la parte superior	<i>Concrete</i>	100	3 800	657	0,34	// Material: concreto
		<i>Concrete Screed</i>	5	2 000	659	0,75	
		<i>Ceramic Tiles</i>	10	1 900	657	0,31	
Cielos-rasos	Paneles de fibra mineral 24"x24", de 15 mm de espesor, coeficiente de absorción acústica de 0,55 NRC, con pintura blanca	<i>Drywall, Canada sultan, tipo X</i>	10	720	1340	0,22	// Material: cielo_raso
Cubierta en	1- Hoja de acero galvanizado	<i>Steel alloy</i>	2	7 750	502,1	41,84	Paneles metálicos con aislamiento

teja termoacústica	prepintado. 2-Espuma rígida de poliuretano 3-Hoja de acero galvanizado prepintado.	<i>and mild</i>					térmico y acústico. La composición se asignó de acuerdo a las especificaciones de Cubiertec S.A. // Material: Cubierta_termoacustica
		<i>Polysterene, extruded</i>	10	35	1470	0	
		<i>Steel alloy and mild</i>	2	7 750	502,1	41,84	
Puertas de madera	Triplex entamborada Color: Chocolate	<i>Wood Pine (With Grain)</i>	40	550	2 301	0,34	// Material: madera
Puertas de vidrio	Vidrio templado	<i>Glass Standard</i>	6	2 300	837	1,05	//Material: GlassSlidingDoor
Ventanas	Vidrio templado, 5 mm	<i>Glass Standard</i>	5	2 300	837	1,05	//Material: ventanas

W: Width – Ancho. D: Density – Densidad. SH: Sp. Heat - Calor Especifico. C: Conduct. - Conductividad

ANEXO J. Variables definidas en el archivo del clima creado con *Weather Tool*

En la Tabla J.1 se presenta la descripción y definición de las variables que requiere *Weather Tool* para crear el archivo del clima con la información necesaria para las simulaciones en *Autodesk Ecotect Analysis*. También se especifican las unidades y formato de los datos.

Tabla J.1. Variables definidas en el archivo del clima

Mes del año [1-12]	El mes del año en que se toma cada medida se indica a partir del número asociado a este.
Día del mes [1-31]	El día del mes se representa a partir del número correspondiente a la fecha en que se toma la medición de las variables meteorológicas.
Hora del día [0-23]	La hora del día se indica teniendo en cuenta que la hora cero (0) corresponde a media la noche, y la hora veintitrés (23) es a las once (11) de la noche.
Temperatura de bulbo seco [°C]	Se refiere a la temperatura del aire, sin tener en cuenta la radiación calorífica de los objetos que rodean ese ambiente concreto, efectos de la humedad relativa y movimientos de aire [1].
Humedad relativa [%]	Humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica [2].
Relación de humedad o humedad específica [g/kg]	Mide la masa de agua que se encuentra en estado gaseoso en un kilogramo de aire húmedo, y se expresa en gramos por kilogramo de aire [3].
Temperatura de punto de rocío [°C]	Temperatura a la que se empieza a condensar el vapor de agua contenido en el aire, produciendo rocío (niebla) [4].
Velocidad del viento [m/s]	Velocidad a la que se mueve el aire a diez (10) metros de altura, que es la norma internacional establecida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como estándar para la medición y seguimiento del viento [5].
Dirección del viento [°E of N]	Dirección desde la cuál sopla el viento, puede ser expresada en grados a partir del norte geográfico (°E of N); donde el norte se encuentra a 0°, este a 90°, sur a 180° y oeste a 270° [6].
Irradiancia solar normal directa [W/m²]	Componente de la radiación solar medida sobre una superficie imaginaria de cara al Sol, de manera que cuando el Sol se mueve a través del cielo, la superficie de medición lo sigue, por lo que la dirección de la radiación incidente siempre es normal (perpendicular) al Sol [7].
Irradiancia solar horizontal global [W/m²]	La cantidad total de radiación de onda corta recibida por una superficie puesta horizontalmente sobre la tierra. Este valor es de interés para las instalaciones fotovoltaicas e incluye la irradiancia directa horizontal y la irradiancia difusa horizontal [7].
Irradiancia solar difusa horizontal [W/m²]	Cantidad de radiación por unidad de área, recibida por una superficie horizontal, que no está afectada por sombras, a la que llega la radiación solar dispersada por moléculas y partículas de la atmósfera y llega uniformemente desde todas las direcciones [7].
Nubosidad [fracción]	La nubosidad es la fracción de cielo cubierto con nubes, en un lugar en particular [8].
Precipitación [mm]	Agua que cae a la superficie terrestre producto de fenómenos meteorológicos, que incluye agua, nieve y granizo [9].

Referencias Bibliográficas

- [1] Sol arq, «Temperatura,» [En línea]. Available: <http://www.sol-arq.com/index.php/factores-ambientales/temperatura>. [Último acceso: 4 Junio 2012].
- [2] Wikipedia: La enciclopedia libre, «Humedad,» 31 Mayo 2012. [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Humedad>. [Último acceso: 4 Junio 2012].
- [3] Newman, Lynn E., «Moisture, Stability, and Precipitation,» 15 Diciembre 2006. [En línea]. Available: http://web.gccaz.edu/~lnewman/gph111/topic_units/moisture/moisture_stabil_prec/moisture_stabil_prec2.html. [Último acceso: 1 Julio 2012].
- [4] Metas y metrologos asociados, «La guía Metas,» Noviembre 2007. [En línea]. Available: <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-07-11-punto-de-rocio.pdf>. [Último acceso: 4 Junio 2012].
- [5] UPME, «Atlas de viento y energía eólica de Colombia,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/CAPITULO1.pdf>. [Último acceso: 6 Junio 2012].
- [6] Tutiempo Network, S.L., «Diccionario meteorológico,» 2012. [En línea]. Available: http://www.tutiempo.net/diccionario/direccion_del_viento.html. [Último acceso: 6 Junio 2012].
- [7] Natural Frequency, «Solar radiation: Components,» [En línea]. Available: <http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/SolarRadiation/Components>. [Último acceso: 6 Junio 2012].
- [8] Wikipedia: La enciclopedia libre, «Nubosidad,» Mayo 2012. [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Nubosidad>. [Último acceso: 6 Junio 2012].
- [9] J. Sánchez, «Precipitaciones,» Junio 2008. [En línea]. Available: <http://hidrologia.usal.es/temas/Precipitaciones.pdf>. [Último acceso: 6 Junio 2012].

ANEXO K. Cálculo de la irradiancia horizontal difusa- Método Collares-Pereira

A continuación se presentan las fórmulas que plantea el método de Collares-Pereira para determinar la irradiancia solar horizontal difusa (D_h) a partir de la irradiancia global horizontal (G_h) y la irradiancia extraterrestre (G_0).

$$K_t = \frac{G_h}{G_0} \quad (\text{Ec. K.1})$$

Donde K_t es el cociente entre el valor de la irradiancia global horizontal (G_h) y la irradiancia extraterrestre (G_0).

$$K_d = \begin{cases} 0,99 & \text{si } K_t \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272 K_t + 9,473 K_t^2 - 21,865 K_t^3 + 14,648 K_t^4 & \text{si } 0,17 < K_t \leq 0,75 \\ -0,54 K_t + 0,632 & \text{si } 0,75 \leq K_t < 0,8 \\ 0,2 & \text{si } K_t = 0,8 \end{cases} \quad (\text{Ec. K.2})$$

K_d es un coeficiente que depende del valor de K_t , y a partir del cual se calcula la irradiancia difusa horizontal (D_h), pues es el cociente entre la irradiancia difusa horizontal (D_h) y la irradiancia global horizontal (G_h). Así, la irradiancia difusa horizontal se calcula de la siguiente manera:

$$D_h = G_h K_d \quad (\text{Ec. K.3})$$

ANEXO L. Cálculo de la altura solar

La altura (h) y el azimut (A_z) solar son los ángulos con los que se determina la posición solar en el sistema de coordenadas celestes horizontales ilustrado en la Figura L.1. La altura solar es la distancia angular entre el horizonte del observador y el Sol. El azimut es la distancia angular, medida desde el sur del lugar del observador y la proyección sobre el horizonte del meridiano del Sol que pasa por el cenit²⁶ del observador [1].

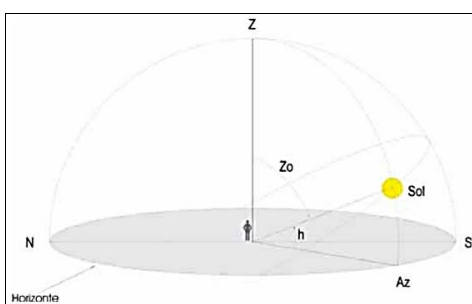


Figura L.1. Sistema de coordenadas celestes horizontales.

El cálculo de la altura solar se hace a partir de la siguiente ecuación:

$$h = \text{sen}^{-1}(\text{sen}\delta \text{ sen}\varphi + \text{cos}\delta \text{ cos}\varphi \text{ cos}\omega) \quad (\text{Ec. L.1})$$

Donde: δ : Declinación [rad]

Φ : Latitud [rad]

ω : Ángulo horario [rad]

A continuación se describen las anteriores variables y la forma en que se calcularon para crear el archivo meteorológico del EEEIE.

1. Declinación solar

El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la tierra y la línea Tierra-Sol se denomina declinación solar (δ). Debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol el valor de este ángulo varía durante el año, tomando valores entre $-23,45^\circ$ y

²⁶ Es el ángulo de 0° entre el punto situado en la cabeza de un observador y el Sol. Esto ocurre si el Sol está situado directamente sobre la cabeza del observador.

23,45°. En la Figura L.2 se muestra una representación el ángulo de declinación solar [2].

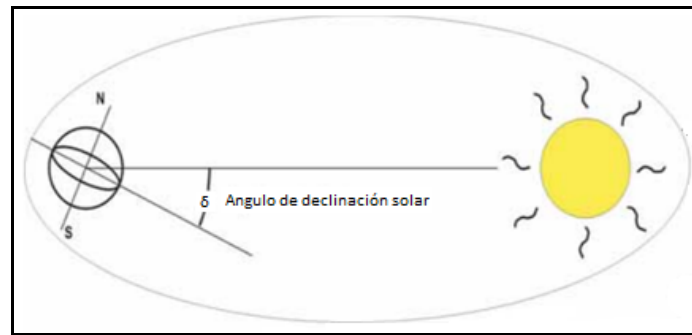


Figura L.2. Declinación solar.

La declinación solar (en radianes) se calcula mediante la fórmula de Spencer:

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos\alpha + 0,070257 \sin\alpha - 0,006758 \cos 2\alpha + 0,000907 \sin 2\alpha - 0,002697 \cos 3\alpha + 0,00148 \sin 3\alpha$$

(Ec. L.2)

Donde, α es la posición angular de la Tierra y una de las variables usadas para describir la órbita elíptica de la Tierra en coordenadas polares. En la Figura L.3 se puede ver el ángulo que representa la posición angular (α) [2].

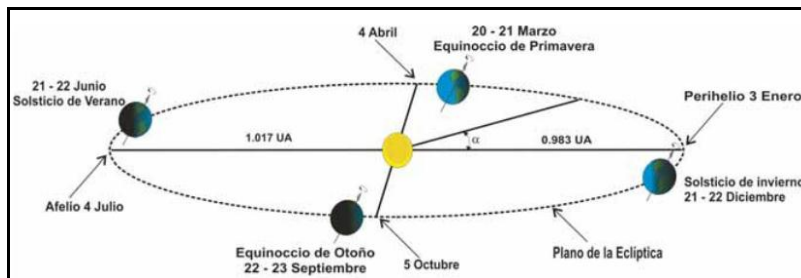


Figura L.3. Órbita de la Tierra.

El valor de la posición angular se calcula a partir de la siguiente fórmula [2]:

$$\alpha = \frac{2\pi(nd-1)}{365} \quad (\text{Ec. L.3})$$

Donde, nd : día del año (1-365)

2. Latitud (Φ)

La latitud es la distancia angular entre la línea ecuatorial, y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto [3].

Para medir la latitud en que se encuentra ubicado el EEEIE se usó un GPS, con el cual se determinó que el edificio se encuentra a 7°08':

$$\Phi = 7^{\circ}08' = 7,133^{\circ} = 0,1245 \text{ [rad]}$$

3. Ángulo horario

El ángulo horario es el ángulo, en radianes, formado en el polo por la intersección entre el meridiano del observador y el meridiano del Sol. Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{2\pi}{24} (TSV - 12) \quad (\text{Ec. L.4})$$

Donde, TSV es el tiempo solar verdadero y está dado por el movimiento diario del Sol en el firmamento (tal como se ve en un reloj de sol). No es uniforme y regular dado que la órbita terrestre es elíptica [4].

El TSV no coincide con el tiempo local (TSM); por lo tanto, es necesario corregir el tiempo debido a las perturbaciones en la velocidad de rotación de la Tierra, y a la diferencia entre la longitud del meridiano del observador y el meridiano sobre el cual se basa la hora local estándar. En Colombia la hora estándar se basa en el meridiano 75° W [2].

El TSV se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación [2]:

$$TSV = TSM + \frac{L_P - L_L}{15} + \frac{E_T}{60} \quad (\text{Ec. L.5})$$

Donde:

TSM: Tiempo solar medio (hora local [1-24])

L_P : Longitud del meridiano de referencia del país (75° en el caso de Colombia)

L_L : Longitud del meridiano del lugar (73,133° para el EEEIE)

E_t : Ecuación del tiempo

La ecuación de tiempo (E_t) es la diferencia de tiempo entre el tiempo solar verdadero (TSV) y el tiempo solar medio (TSM), el cual varía diariamente en un

intervalo pequeño entre -14 y 16 minutos. El modelo matemático usado para el cálculo de E_t es la serie de Fourier que se presenta en la siguiente ecuación [2]:

$$E_t = 0,017189 + 0,428108 \cos\alpha - 7,351407 \operatorname{sen}\alpha - 3,349467 \cos 2\alpha - 9,187597 \operatorname{sen} 2\alpha \quad (\text{Ec. L.6})$$

Referencias Bibliográficas

- [1] UPME-IDEAM, «Atlas de radiación solar de Colombia - Apéndice B,» 2005. [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/8-Apendice_B.pdf. [Último acceso: 3 Julio 2012].
- [2] UPME - IDEAM, «Atlas de radiación solar de Colombia - Apéndice A,» 2005. [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/7-Apendice_A.pdf. [Último acceso: 2 Julio 2012].
- [3] Wikipedia: La enciclopedia libre, «Latitud,» [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Latitud>. [Último acceso: 12 Octubre 2012].
- [4] Wikipedia: La enciclopedia libre, «Tiempo solar verdadero,» 27 Febrero 2011. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Tiempo_solar_aparente. [Último acceso: 6 Octubre 2012].

ANEXO M. Formas de medir el confort térmico

1. Grados-hora de desconfort

Los grados-hora son diferencias de temperatura acumuladas, útiles como un índice del efecto del clima en el uso energético para calentamiento o enfriamiento, pues no sólo reflejan el alejamiento de las condiciones de confort, sino también el tiempo que cada nivel de temperatura permanece en el ambiente [1]. Es el método recomendado por la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning* (ASHRAE) para medir el nivel de confort térmico de una zona [56].

Los grados de desconfort se calculan como la diferencia entre la temperatura de bulbo seco externa y la temperatura de confort, para cada día u hora [3]. *Autodesk Ecotect Analysis* lo calcula de forma horaria, de manera que se pondera cada hora de desconfort de acuerdo al número de grados por fuera de la franja de confort, este procedimiento se hace para cada mes. Si una zona pasa una hora cuatro grados por encima de la franja de confort, ésta contribuirá con cuatro grados-hora al total [4].

$$Gh_{mes} = 1h \sum_1^{n*24} (T_{horaria} - T_{base}) \quad (Ec. M.1)$$

Donde: Gh_{mes} : Grados-hora del mes (°C·h)

T_{base} : Temperatura base (límite de referencia, inferior o superior, de la franja de confort - °C)

$T_{horaria}$: Temperatura horaria (°C)

n: día del mes; $1 < n < 30$ ó $1 < n < 31$, dependiendo del número de días del mes.

Existen dos tipos de grados día: de calefacción y enfriamiento. Los grados día de calefacción indican los requerimientos de calefacción. Los grados día de enfriamiento indican el calor del verano y a su vez los requerimientos de enfriamiento. Por lo tanto, los grados día de enfriamiento son útiles para monitorear el consumo de energía de los aires acondicionados, cuando éstos se

usan en los casos en que la temperatura ambiente es mayor que la temperatura considerada de confort [3].

Autodesk Ecotect Analysis muestra los grados-hora de disconfort acumulados en cada mes del año mediante un gráfico de barras. Se indica si los grados día fueron de calefacción o enfriamiento con el color de las barras que puede ser rojo o azul, respectivamente.

2. Horas totales y porcentaje de disconfort

Las horas totales de disconfort son aquellas durante las cuales la temperatura interna de una zona estuvo fuera de la franja de confort. *Autodesk Ecotect Analysis* muestra las horas de disconfort acumuladas en cada mes del año mediante un gráfico de barras. Además se indica si se produjeron por calor o frío con el color de las barras que puede ser rojo o azul, respectivamente.

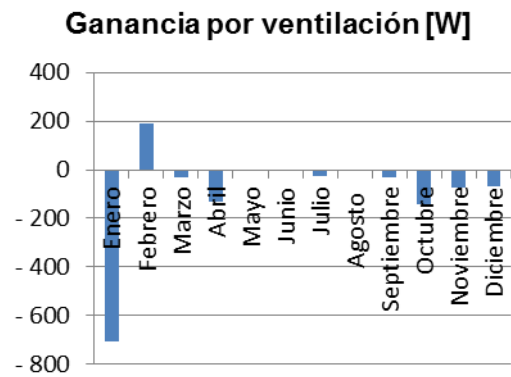
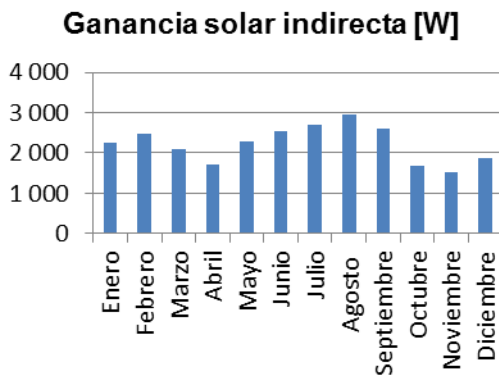
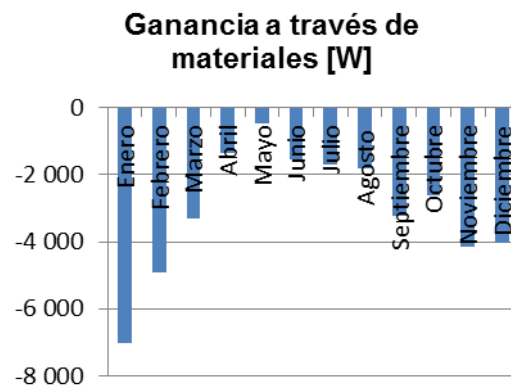
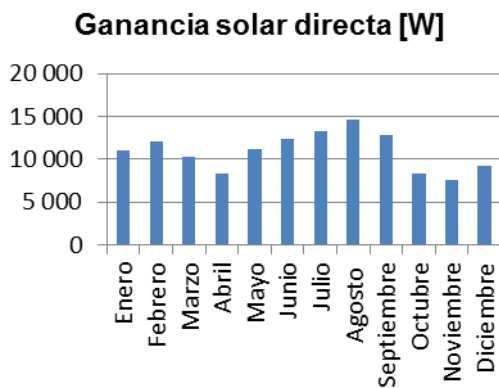
La gráfica de porcentaje de disconfort es la representación de las horas totales como un porcentaje respecto a las horas del año.

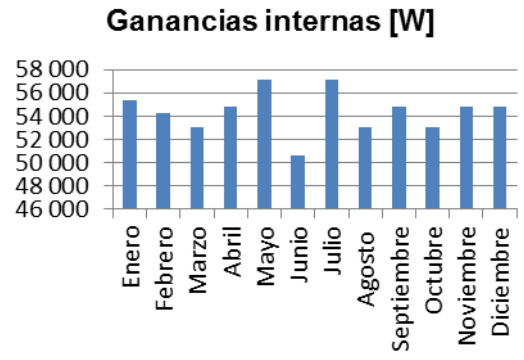
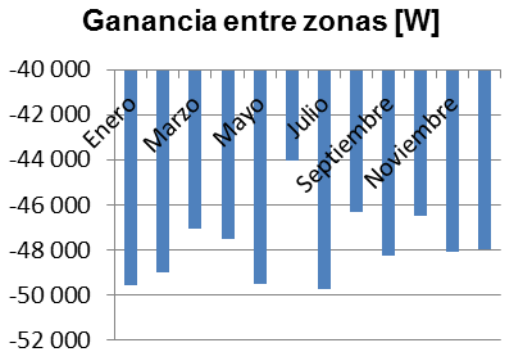
Referencias Bibliográficas

- [1] C. Pérez, H. Campbell, A. Borroto y J. Monteagudo, «Horas-grado, un criterio realista para caracterizar climatológicamente una región con propósitos de uso eficiente y ahorro de energía eléctrica,» [En línea]. Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar07/HTML/articulo04.htm>. [Último acceso: 17 Mayo 2012].
- [2] ASHRAE. ASHRAE Fundamentals: Thermal comfort. 2009.
- [3] CIBSE, CIBSE Guide A: Environmental design, London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, Séptima edición. 2006.
- [4] Marsh, Andrew; Autodesk Inc. Help Ecotect 2011. 2010.

ANEXO N. Gráficos de ganancias mensuales del aula 515

En este anexo se presentan los gráficos de ganancias solar directa, a través de, indirecta e internas y las pérdidas por ventilación, materiales y entre-zonas del aula 515 agrupados de manera mensual, con el fin de relacionarlos con el comportamiento de los grados-hora de discomfort.





ANEXO Ñ. Cumplimiento del derecho a la luz establecido por la BRE

El análisis del derecho a la luz parte de lo establecido por el *Building Research Establishment* (BRE), en la publicación *Site Layout Planning for Daylight and Sunlight: A Guide to Good Practice*. En ella se plantea que para definir si un edificio mantiene su potencial de iluminación natural difusa se debe analizar si las obstrucciones son suficientemente altas para ser consideradas, si bloquean demasiado la visión del cielo y si la “línea sin cielo”²⁷ de cada habitación es impactada significativamente [1].

Para concluir si se respeta el derecho a la luz de una edificación se hacen tres tipos de simulaciones: envolvente²⁸, cálculo de la componente vertical del cielo²⁹ y comparación de las “líneas sin cielo” de las habitaciones. La BRE establece en su publicación *Site Layout Planning for Daylight and Sunlight: A Guide to Good Practice*, el procedimiento para determinar si las obstrucciones aledañas a una edificación violan su derecho al acceso a la iluminación natural. En él se definen tres criterios que deben analizarse: si las obstrucciones son suficientemente altas para ser consideradas (envolvente), si bloquean demasiado la visión del cielo (componentes verticales del cielo) y si la “línea sin cielo” de cada habitación es impactada significativamente [1].

De acuerdo a lo establecido por la BRE, las simulaciones se deben realizar en la secuencia en que se mencionaron; si los resultados de la simulación previa indican que se presenta la violación al derecho a la luz natural. Es decir, que si los resultados de la envolvente indican que las obstrucciones son suficientemente altas para ser consideradas, se debe proceder a calcular las componentes verticales del cielo, y si los resultados de la simulación de componentes verticales

²⁷ Punto al interior de una edificación a partir del cual no se puede ver directamente ninguna parte del cielo a través de las ventanas [67].

²⁸ Planos trazados sobre cada fachada de la edificación bajo análisis, con el fin de verificar si las obstrucciones adyacentes son suficientemente altas para violar el derecho a la luz natural [67].

²⁹ Medida de la disponibilidad de luz natural definida por la BRE, que se usa para determinar la extensión del cielo bloqueada por una obstrucción [67].

del cielo apuntan a que se bloquea demasiado la visión del cielo, se debe analizar la línea sin cielo. Si alguno de los análisis establece que no se está violando el derecho a la luz, no es necesario seguir con el proceso.

A continuación se definen las tres herramientas con las que *Autodesk Ecotect Analysis* permite evaluar el cumplimiento del derecho a la luz de una edificación, teniendo en cuenta lo establecido por la BRE.

Envolvente solar de la edificación

La prueba de la envolvente se usa como primera instancia para determinar si se requiere un análisis más extensivo para determinar la influencia de las obstrucciones sobre la edificación. Si ninguna parte de las obstrucciones se encuentra por encima del plano con el que se define la envolvente, no se infringirán los derechos a la luz.

En la Figura Ñ.1 se presenta una envolvente solar generada por *Autodesk Ecotect Analysis* [1].

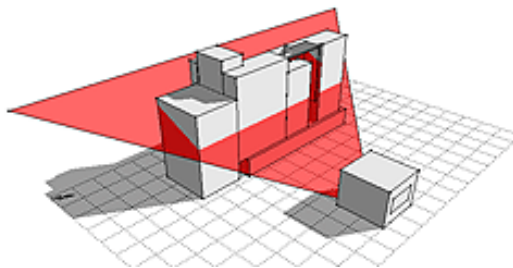


Figura Ñ.1. Envolvente solar generada con *Autodesk Ecotect Analysis*.

Mediante la envolvente solar se determina si la altura de las obstrucciones es tal que reduce significativamente la cantidad de luz natural que llega al edificio. Para ello, la guía BRE sugiere dibujar una sección normal de cada fachada del edificio, dos metros (2 m) por encima del nivel del suelo. A partir de esta línea se dibuja otra línea que forme un ángulo de 25° con la horizontal. Si algún edificio se encuentra por encima de esta línea, es suficientemente alto para ser considerado. En la Figura Ñ.2 se ilustra este criterio [1].

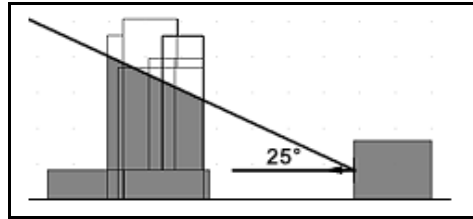


Figura N.2. Criterio para determinar si un edificio es suficientemente alto para ser considerado como una posible obstrucción.

Componentes verticales del cielo - VSC

La BRE define el factor de luz natural vertical (en inglés VSC) como una medida de la disponibilidad de luz natural, que se usa para determinar la extensión del cielo que bloquea una obstrucción. Se considera que llega suficiente luz a una ventana si VSC es mayor a 27% [1].

El VSC se debe calcular en el centro de las ventanas para usarlo como medida para cuantificar la cantidad de luz natural que entra a una habitación. Las ventanas de baños, bodegas, áreas de circulación y garajes no requieren ser analizadas [1].

La guía de la BRE provee diagramas Waldram³⁰ para estimar los valores VSC; sin embargo este valor se estima en *Autodesk Ecotect Analysis* a partir de la Máscara de sombras³¹ generada para las ventanas de la zona en análisis [1].

Línea sin cielo

Si los dos criterios anteriores implican que se viola el derecho a la luz en la edificación de interés, se termina revisando si las obstrucciones reducen significativamente el área de un cuarto con acceso directo al cielo. Esto se calcula usando el concepto de la línea sin cielo (*no sky line*) [1].

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

³⁰ El diagrama usado para estimar la iluminancia directa que llega a un punto en particular, proveniente del cielo. Se emplea en el diseño de edificaciones cuando se requiere establecer si se tiene un potencial adecuado de iluminación natural, y en casos legales de Derecho a la luz cuando se debe investigar los efectos de nuevos edificios.

³¹ Mecanismo para registrar qué partes del cielo son visibles desde un punto particular del modelo y cuales no. El diagrama se genera proyectando las superficies de las obstrucciones hasta el punto en que se genera la máscara.

se calcula usando los valores de la componente del cielo, pero *Autodesk Ecotect Analysis* lo hace automáticamente a partir de una red de análisis (*Analysis grid*) sobre el área del piso en cada habitación [1].

Referencias Bibliográficas

- [1] Autodesk, Inc. Help Ecotect 2011. 2010.

ANEXO O. Radiación solar [1]

El software *Autodesk Ecotect Analysis* permite analizar varias de las componentes que forman parte de la radiación solar entre las que se tienen:

- Radiación incidente
- Radiación absorbida
- Radiación transmitida
- Radiación directa
- Radiación difusa
- Radiación reflejada

El cálculo de cada componente depende de la configuración elegida y se ven afectadas básicamente por la geometría del modelo y del archivo de los datos meteorológicos cargados en el mismo. A continuación se presenta una síntesis de todas las componentes y de la forma como *Autodesk Ecotect Analysis* las calcula.

RADIACION SOLAR INCIDENTE

Este tipo de radiación se refiere a la cantidad de energía que cae sobre una superficie y se ve afectada directamente por el ángulo de incidencia de la radiación (A). La forma de cálculo utilizada por *Autodesk Ecotect Analysis* se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{incidente} = [(E_{beam} \cos(A) \times F_{shad}) + (E_{diffuse} F_{sky})] \times ExposedArea \quad (Ec. O.1)$$

Donde se tienen las siguientes variables:

- F_{shad} : La fracción de la superficie que posee actualmente sombra, debido a alguna obstrucción externa.
- F_{sky} : La fracción del cielo difuso realmente visible desde la superficie
- $ExposedArea$: la zona de la superficie realmente expuesta a la radiación solar
- E_{beam} : Radiación emitida en una dirección particular.
- $E_{diffuse}$: La componente de Radiación difusa.

RADIACION SOLAR ABSORBIDA Y TRANSMITIDA

Estos tipos de radiación hacen referencia a la cantidad de energía absorbida o transmitida a través de una superficie. Estos valores dependen principalmente de las propiedades de los materiales asignados al modelo.

La forma de cálculo utilizada por *Autodesk Ecotect Analysis* es mostrada en la siguiente ecuación, donde la radiación solar absorbida, se ve afectada principalmente por tres elementos el primero es la radiación incidente, el segundo es la absorción correspondiente a material opaco F_{abs} y el tercero es el valor de transparencia F_{trans} .

$$W_{absorbed} = W_{incident} * (1 - F_{trans}) * F_{abs} \text{ (Ec. 0.2)}$$

Para el cálculo de la radiación transmitida, se observa que depende del elemento constitutivo sobre el cual se desarrollara la simulación, es decir, para las ventanas se emplea la siguiente ecuación, donde esta componente se ve afectada principalmente por la radiación incidente, por un factor correspondiente a la transparencia del material F_{trans} , el coeficiente de sombra sc y los efectos de refracción $F_{refract}$.

$$W_{transmitted} = W_{incident} * F_{trans} * sc * F_{refract} \text{ (Ec. 0.3)}$$

Para elementos diferentes a ventanas como pisos, paredes y techos aplica la ecuación.

$$W_{transmitted} = W_{incident} * F_{trans} \text{ (Ec. 0.4)}$$

RADIACION DIRECTA Y DIFUSA

El software *Autodesk Ecotect Analysis* calcula la componente de radiación directa como un valor en W / m^2 y se obtiene de medir en una superficie directamente expuesta al sol. A medida que el sol pasa por esta superficie se rastrea de manera que la dirección de la radiación incidente sea siempre normal a la misma.

La componente difusa también se da en W / m^2 y se toma como la energía disponible de la cúpula cielo entero, menos el valor de radiación directa, medida sobre una superficie horizontal plana. Una vez que este valor es conocido, puede ser moderado por el ángulo de inclinación de cada superficie en el modelo.

RADIACION REFLEJADA

La radiación reflejada calculada por *Autodesk Ecotect Analysis* depende de dos factores: el ángulo de incidencia y el índice de refracción de cada material, este último es suministrado, y solo se aplica a los materiales de las ventanas (y las cubiertas transparentes de colectores solares). Cuanto mayor sea su valor, mayor será el efecto. *Autodesk Ecotect Analysis* ignora valores inferiores a 1,0 ya que esto representa una interfase entre un mismo elemento aire-aire en la que no hay refracción.

Referencias Bibliográficas

- [1] Autodesk, Inc. Help Ecotect 2011. 2010.

ANEXO P. Medición del *Daylight Factor*

Las medidas de luz pueden ser complejas, especialmente cuando se trata de la producción total de una fuente de luz y las cantidades relativas que viajan en cada dirección. Sin embargo, esto se simplifica cuando se trata solamente con la luz día, ya que la fuente es bien conocida y normalmente interesa sólo su impacto y reflexión en las superficies planas [1].

Así, hay dos medidas distintas utilizadas para describir la luz del día:

Luminosidad

También se conoce como intensidad luminosa, se refiere a la cantidad que el de la luz que es emitida o reflejada por una superficie determinada, y se mide en cd/m^2 , o candelas por metro cuadrado [1].

Iluminancia

Esta es una medida de la cantidad de luz en realidad cae sobre una superficie particular, y se utiliza para determinar el nivel de iluminación de la superficie de trabajo, tarea o tipo de ambiente. La iluminancia se mide en lux, o lúmenes por metro cuadrado [1].

Dentro de cualquier entorno, las luces y las lámparas proporcionan luminosidad, mientras que los códigos de construcción y las normas internacionales establecen la cantidad de iluminación que se debe proporcionar en una superficie de trabajo o para una tarea particular. Por lo tanto, es de vital importancia que los diseñadores comprendan plenamente la diferencia entre estos dos valores [1].

Diseño de niveles de iluminación

La cantidad de iluminación requerida para un espacio o edificio variará dependiendo de las actividades que se realizan dentro de ella. Las tareas que

requieren la discriminación visual, necesitan niveles altos de luz, mientras que simplemente moverse o caminar a través de un espacio requiere mucho menos [1].

A pesar de que los niveles de iluminación de diseño están especificados en el RETILAP y otras normas internacionales, es importante para todos los diseñadores tener un conocimiento general de los diferentes niveles de luz y los tipos de tareas para los cuales son.

Niveles de diseño para las tareas comunes y ambientes

La Tabla P.1 enlista los niveles de iluminación reglamentados para diferentes tipos de recinto y actividades.

TIPO DE RECINTO Y ACTIVIDAD	UGR _t	NIVELES DE ILUMINANCIA (lx)		
		Mínimo.	Medio	Máximo
Áreas generales en las edificaciones				
Áreas de circulación, corredores	28	50	100	150
Escaleras, escaleras mecánicas	25	100	150	200
Vestidores, baños.	25	100	150	200
Almacenes, bodegas.	25	100	150	200
Oficinas				
Oficinas de tipo general, mecanografía y computación	19	300	500	750
Oficinas abiertas	19	500	750	1000
Oficinas de dibujo	16	500	750	1000
Salas de conferencia	19	300	500	750
Colegios y centros educativos.				
<i>Salones de clase</i>				
Iluminación general	19	300	500	750
Tableros	19	300	500	750
Elaboración de planos	16	500	750	1000
<i>Salas de conferencias</i>				
Iluminación general	22	300	500	750
Tableros	19	500	750	1000
Bancos de demostración	19	500	750	1000
Laboratorios	19	300	500	750
Salas de arte	19	300	500	750
Talleres	19	300	500	750
Salas de asamblea	22	150	200	300

Tabla P.1. Niveles de iluminación recomendados de acuerdo al tipo de recinto y actividad [2]

1. La eficacia luminosa

La eficacia luminosa es la relación entre la cantidad de luz que genera una fuente con relación a su salida de calor. Se mide en lúmenes por Watt (lm / W). Si una fuente de luz tiene una alta eficacia luminosa, genera luz de forma más eficiente con respecto al calor [1].

La luz del día en un cielo claro, como se en la Tabla P.2, tiene una de las mayores eficacias luminosas de cualquier fuente, natural o artificial. Así, en sustitución de la iluminación artificial siempre que sea posible con luz natural puede reducir significativamente la cantidad de calor generado en el interior de un edificio [1].

Light Source	Efficacy (lumens/Watt)
Direct Sun (low altitude)	90 lm/W
Direct Sun (high altitude)	117 lm/W
Direct Sun (mean altitude)	100 lm/W
Diffuse Sky (clear)	150 lm/W
Diffuse Sky (average)	125 lm/W
Global (average of sky and sun)	115 lm/W
Incandescent (150 W)	16-40 lm/W
Fluorescent (40 W, CWX)	50-80 lm/W
High Pressure Sodium	40-140 lm/W

Tabla P.2. Eficacia luminosa de distintas fuentes de luz [1]

Modelos de distribución de luminancia celeste

Si bien la principal fuente de luz natural es el mismo Sol, la dispersión atmosférica y la reflexión en las nubes, significa que todo el cielo también emite luz. Para efectos de diseño de iluminación natural, el cielo puede ser considerado como una gran superficie semiesférica, o cúpula, que rodea completamente cada edificio o espacio [1], como se muestra en la Figura P.1

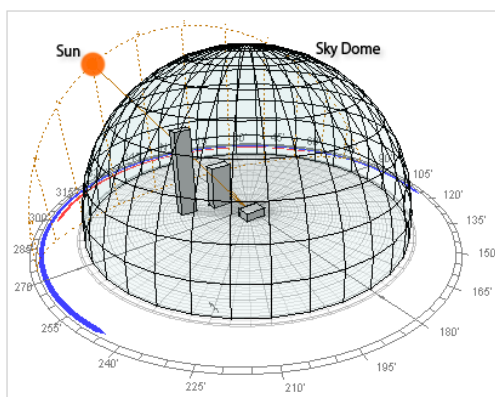


Figura P.1. El Sol y la bóveda del cielo conceptual [1].

La cantidad de luz emitida por la bóveda celeste depende de las condiciones ambientales actuales. Las condiciones del cielo pueden variar significativamente, como se ilustra en la Figura P.2. Estas imágenes de ejemplo muestran claramente que la distribución de luminancia en diferentes partes de la bóveda celeste es con frecuencia irregular. Esto se conoce técnicamente como una fuente de luz anisotrópica [1].

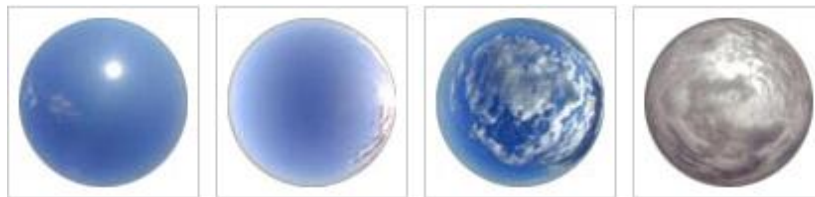


Figura P.2. Ejemplos de diferentes condiciones de cielo [1].

Debido a que las condiciones del cielo pueden variar incluso minuto a minuto durante todo el día, la *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) ha desarrollado una serie de modelos matemáticos para describir las condiciones típicas, o promedio general del cielo. Los tres modelos más utilizados son los presentados en la Figura P.3 claros, uniformes y nublados [1].

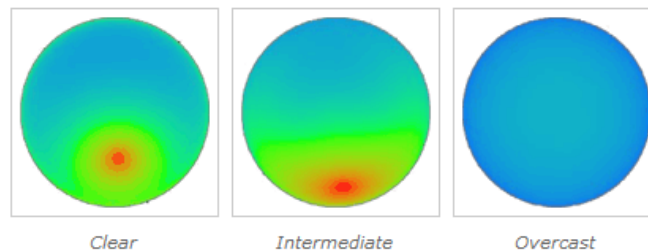


Figura P.3. Una comparación de los tres modelos principales cielo CIE [1].

En todos estos modelos, se asume que la cúpula cielo en su totalidad, tiene cierto nivel de luminancia que varía con el ángulo vertical del horizonte al cenit, y es relativa a la posición actual del Sol. Esta luminosidad se debe a las moléculas de aire, partículas en suspensión, las nubes y vapor de agua que se dispersan y reflejan la luz del Sol por el cielo [1].

CIE cielo nublado

El modelo de distribución de cielo nublado se basa en un cielo completamente nublado, donde el Sol y su posición no son evidentes. El paso de la radiación a través de las nubes, por lo general produce, algo muy cercano a la luz blanca, debido a la humedad (en forma de gotas bastante grandes) que afecta todas las frecuencias de la luz. Sin embargo, si la atmósfera está muy contaminada el cielo nublado, la apariencia y el color puede ser ligeramente amarillo [1].

La distribución de luminancia es simétrica respecto al cenit y es menor en el horizonte de sobrecarga. Dada una iluminancia del cenit (L_z) y su altura (a), la luminancia en cualquier punto (L) en el cielo viene dada por [1]:

$$L = L_z \frac{1+2\sin(\alpha)}{3} \quad (\text{Ec. P.1})$$

Para el cielo nublado, la iluminación en el cenit ($a = 90^\circ$) es tres veces más brillante que en el horizonte ($a = 0^\circ$). Esto significa que los tragaluces, serán mucho más eficaz para la iluminación natural por unidad de área que las ventanas o aberturas laterales verticales [1].

CIE cielo uniforme

Este modelo representa un cielo con un valor constante de luminancia. Por lo tanto todos los puntos en el modelo de cielo uniforme devolverán un valor de 1,0. Algunos investigadores creen que el cielo uniforme es el modelo más apropiado a utilizar para las regiones tropicales [1].

Otros modelos Sky

Otros modelos cielo también se utilizan además de los desarrollados por la CIE. Por ejemplo, el *Building Research Establishment* (BRE), la fórmula cielo medio es

similar a la CIE cielo despejado, ya que supone una distribución no uniforme de la iluminación. Sin embargo, esta fórmula trata el efecto de las nubes de manera diferente a fin de reflejar mejor las condiciones europeas. Esta fórmula difiere también en que no devuelve un valor de luminancia relativa, sino una luminancia absoluta en miles de candelas por metro cuadrado (kcd/m^2). La luminancia (L) en cualquier punto de la bóveda cielo está dada por [1]:

$$L = a e^{-k/40} + b \left[\frac{5 - (2 \sin(z))}{3} \right] \quad (\text{Ec. P.2})$$

Donde,

a & b : coeficientes ajustables cuyas ecuaciones se dan a continuación,

k : ángulo (en radianes) entre el punto con la luminancia L y el Sol, y

z : ángulo cenital del punto.

$$a = 0.1 + 0.42z_s - 0.7 \sin(7.2z_s) \quad (\text{Ec. P.3})$$

$$b = \frac{9(0.3 + 0.434z_s - 0.0042z_s^2)}{(11 P_i)} \quad (\text{Ec. P.4})$$

Siendo z_s el ángulo cenital del sol.

Referencias Bibliográficas

- [1] Autodesk, Inc., Autodesk Ecotect - Daylight Factor Training Package (complemento para Autodesk Ecotect Analysis), [En línea] Disponible en: <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/index?siteID=123112&id=13734593>, 2008.
- [2] Ministerio de minas y energía de Colombia, RETILAP: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, Bogotá, D.C.: República de Colombia, 2010.

ANEXO Q. Descripción de espacios interiores del EEEIE

A continuación se muestra una descripción cuantitativa y cualitativa de los espacios interiores del EEEIE.

Nivel	Aula	Fachada	Área [m2]	Ubicación de ventanas [Fachada]	Tiempo de uso [h/semana]	Ocupación (máx # personas)	Potencia/área [W/m2]	Equipos	Cortasol	Actividad / Descripción
0	Baño P0	Norte	7,11	Norte	-	-	29,26	-	No	Baño
0	Bodega	Norte	23,46	Norte	-	-	11,08	-	No	Almacenar
0	Planta Eléctrica	Occidente	45,54	-	-	-	7,47	-	No	Planta Eléctrica
0	Laboratorio	Norte-Occidente	184,27	Norte	-	-	5,90	-	No	Laboratorio
0	Entrada Sub	Occidente	16,37	-	-	-	4,16	-	No	Acceso
0	Sub. Eléctrica	Occidente	33,41	-	-	-	2,04	-	No	Sub. Eléctrica
1	Salón 102 - Centro de Estudios	Sur	167,97	Sur	50	102	7,72	1 computador Posible uso de portátiles	Si	Clase
1	Salón 101 – Fundadores	Sur	79,53	Sur	3-5	39	8,15	Vídeo beam, telón, computador	Si	Clase
1	Salón 103 – Excelencia	Sur	169,65	Sur	31	64	7,64	Vídeo beam, computador	Si	Clase
1	Pasillo atrás izquierda - P1	Oeste	67,77	Occidente (falta ponerla)	-	-	9,21	-	Si	Pasillo/Circulación
1	106 - Auditorio Guillermo Camacho Caro	Interno	163,58	-	Varía	184	0,00	-	No	Auditorio
1	111 - Sala de computo 0.1	NorOeste	76,00	Norte	47	36	10,84	videobeam, telón, 35 computadores	No	Computadores
1	Salón 118- Emprendedores	Este	105,23	-	22	54	8,21	VIDEO BEAM - TELON, PC	No	Clase
1	Aseo Auditorio	Interno	0,94	-	-	-	55,61	-	No	Aseo/Almacen
1	Aseo P1	Interno	2,38	-	-	-	21,83	-	No	Aseo/Almacen
1	Armoire Auditorio	Interno	2,71	-	-	-	19,22	-	No	Aseo/Almacen
1	Información	Interno	6,29	Interna	-	-	16,53	-	No	Información
1	Sala de reuniones	Norte	11,55	Norte	-	12	11,78	espacio para 6 portátiles	No	Reuniones
1	Sala de reuniones	Norte	11,55	Norte	-	12	11,78	espacio para 6 portátiles	No	Reuniones
1	117 - Profesores cátedra	NorEste	73,57	Norte	-	-	27,40	-	No	Oficinas-Cubículos
1	117 - Profesores cátedra	NorEste	73,57	Norte	-	-	11,09	-	No	Oficinas-Cubículos
1	Baño Hombres Auditorio	-	10,07	-	-	-	10,32	-	No	Baño
1	Cuarto Aud. Guillermo Cam. Caro	Interno	5,04	-	-	-	10,31	-	No	Aseo/Almacen
1	Pasillo frente P1	Interno	45,68	Tiene vacíos	-	-	10,25	-	No	Pasillo/Circulación
1	Pasillo frente P1	Interno	45,68	Tiene vacíos	-	-	10,25	-	No	Pasillo/Circulación
1	Pasillo atrás P1	Norte	30,22	- (puerta vidrio)	-	-	6,88	-	No	Pasillo/Circulación
1	Pasillo atrás P1	Norte	30,22	- (puerta vidrio)	-	-	6,88	-	No	Pasillo/Circulación
1	Baño Mujeres P1	Norte	15,28	Norte	-	-	6,81	-	No	Baño

1	Baño Mujeres P1	Norte	15,28	Norte	-	-	6,81	-	No	Baño
1	Baño Hombres P1	Norte	15,58	Norte	-	-	6,68	-	No	Baño
1	Baño Mujeres Auditorio	Interno	17,33	-	-	-	0,23	-	No	Baño
1	Oficina Computo	Norte	11,90	Norte	-	-	5,71	-	No	Oficina
1	Racks	Norte	10,15	Norte	-	-	10,64	-	No	Almacen equipos de computo y telecomunicaciones
1	Sala de computo 02	Norte	43,65	Norte	-	-	9,90	-	No	Computadores
1	Lobby	Oeste	73,92	-	-	-	4,92	-	No	Común
1	Hall	Interno	105,60	Tiene vacíos	-	-	10,53	-	No	Pasillo/Circulación
1	Hall	Interno	105,60	Tiene vacíos	-	-	2,95	-	No	Pasillo/Circulación
1	Ascensor	Interno	5,84	-	-	-	0,00	-	No	Ascensor
1	Ascensor	Interno	5,84	-	-	-	0,00	-	No	Ascensor
1	Cafetería	Este	20,70	Este	-	-	31,40	-	No	Cafetería - Ventas
1	Cafetería	Este	20,70	Este	-	-	0,00	-	No	Cafetería - Ventas
1	Cuarto 1 Cafetería	Interno	2,69	-	-	-	11,17	-	No	Almacén de alimentos
1	Cuarto 1 Cafetería	Interno	2,69	-	-	-	0,00	-	No	Almacén de alimentos
1	Cuarto 2 Cafetería	Este	1,87	Este	-	-	16,03	-	No	Almacén
1	Cuarto 2 Cafetería	Este	1,87	Este	-	-	0,00	-	No	Almacén
2	Aula 201 - Saln de mejoramiento cont.	SurEste	77,90	Sur- Norte (interno)	62	-	10,89	VIDEO BEAM - TELON Y SONIDO Y PC	Si	Clase
2	Aula 206	SurOeste	70,02	Sur	61	-	12,11	Videobeam, telon, sonido y pc	Si	Clase
2	Aula 204	Sur	58,00	Sur	0	Vacio	11,17	-	Si	Clase
2	Aula 202	Sur	58,00	Sur	0	Vacio	11,17	-	Si	Consultorio empresarial
2	Cafetería	Interno	5,29	Interno	-	-	25,71	1 nevera	No	Cafetería
2	29 - Sala Reuniones	Interno	17,32	Interno	-	10	23,56	Una mesa y 10 sillas	No	Reuniones
2	31 - Sala Reuniones	Oeste	8,63	-	-	-	38,95	-	No	Reuniones
2	27 - Sala Reuniones	Interno	8,90	-	-	-	37,76	-	No	Reuniones
2	33	Sur (Interno)	9,54	Sur (Interno)	-	2	14,26	1 PC	No	Oficina
2	35	Sur (Interno)	9,64	Sur (Interno)	-	2	14,11	1 PC	No	Oficina
2	32	Sur (Interno)	9,79	Sur (Interno)	-	2	13,89	1 PC	No	Oficina
2	34	Sur (Interno)	9,79	Sur (Interno)	-	2	13,89	1 PC	No	Oficina
2	24	Norte	10,21	Norte	-	2	13,32	1 PC	No	Oficina
2	9	Oeste	10,22	-	-	2	13,31	1 PC	No	Oficina
2	23	Norte	10,31	Norte	-	2	13,19	1 PC	No	Oficina
2	25	Norte	10,31	Norte	-	2	13,19	1 PC	No	Oficina
2	26	Norte	10,31	Norte	-	2	13,19	1 PC	No	Oficina
2	22	Norte	10,33	Norte	-	2	13,17	1 PC	No	Oficina
2	10	Oeste	10,53	-	-	2	12,92	1 PC	No	Oficina
2	8 - Sala Reuniones	Oeste	21,49	-	-	5	21,97	-	No	Reuniones
2	11	NorOccidente	11,14	Norte	-	2	12,20	1 PC	No	Oficina
2	12	Norte	11,43	Norte	-	2	11,90	1 PC	No	Oficina
2	13	Norte	11,43	Norte	-	2	11,90	1 PC	No	Oficina
2	14	Norte	11,43	Norte	-	2	11,90	1 PC	No	Oficina
2	15	Norte	11,43	Norte	-	2	11,90	1 PC	No	Oficina
2	16	Norte	11,43	Norte	-	2	11,90	1 PC	No	Oficina
2	17	Norte	11,43	Norte	-	2	11,90	1 PC	No	Oficina
2	18	Norte	11,43	Norte	-	2	11,90	1 PC	No	Oficina
2	3	Interno	12,21	-	-	2	11,14	1 PC	No	Oficina
2	4	Interno	12,28	-	-	2	11,08	1 PC	No	Oficina
2	2	Interno	12,76	-	-	2	10,66	1 PC	No	Oficina
2	1	Interno	13,92	-	-	2	9,77	1 PC	No	Oficina
2	Bodega	Interno	13,15	-	-	-	7,91	-	No	Oficina
2	Acceso Principal	Sur	139,10	Sur	-	-	7,85	-	No	Pasillo/Circulación
2	Pasillo Atrás	Interno	215,00	Ventanas (internas) + puertas de vidrio	-	-	7,01	-	No	Pasillo/Circulación
2	Baños Mujeres	Norte	15,28	Norte	-	-	6,81	-	No	Baño
2	Baños Hombres	Norte	15,58	Norte	-	-	6,68	-	No	Baño
2	Cabina de sonido	Interno	27,61	-	-	-	40,00	-	No	Oficina

2	Ascensor	Interno	5,49	-	-	-	0,00		No	Ascensor
2	Aula 205	Sur	60,51	Sur	71	39	10,71	Telón, PC	Si	Clase
3	304	Sur	55,81	Sur	75	32	8,46	sonido, telón, videobeam, PC	Si	Clase
3	306	Sur-occidente	69,22	Sur	69	36	8,78	sonido, telón, videobeam, PC	Si	Clase
3	301	Sur-oriente	77,96	Sur-(Norte-palmera)	64	39	7,80	sonido, telón, videobeam, PC	Si	Clase
3	305	Sur	64,25	Sur	58	41	7,35	sonido, telón, videobeam, PC	Si	Clase
3	302	Sur	58,12	Sur	48	39	10,46	sonido, telón, videobeam, PC	Si	Clase
3	316	Norte	90,75	Norte	-	50	8,20	-	No	Clase
3	310	Norte	54,93	Norte	64	35	8,59	sonido, telón, videobeam, PC	No	Clase
3	307	Occidente	77,93	Occidente	58	44	7,80	sonido, telón, videobeam, PC	No	Clase
3	309	Nor-occidente	49,06	Norte	44	29	9,62	Telón, sonido	No	Clase
3	303	Sur	55,37	Sur	43	37	8,52	sonido, telón, videobeam, PC	No	Clase
3	311	Norte	46,03	Norte	40	32	5,91	Telón y sonido.	No	Clase
3	317	Norte	115,65	Sur (palmera)	26	35	4,70	Telón y PC	No	Clase
3	Rack	Interno	7,44	-	-	-	9,13	-	No	
3	Pasillo P3.	Interno	223,15	-	-	-	15,72	-	No	Pasillo/circulación
3	Baños H P3	Norte	15,58	Norte	-	3	6,68	-	No	
3	Baños M P3	Norte	16,05	Norte	-	10	6,48	-	No	
3	Deposito	Interno	8,66	-	-	10	12,47	-	No	Almacenamiento de utensilios de aseo
4	405	Sur	33,05	Sur	No definido	16	9,80	tablero	Si	Salón Posgrado
4	403	Sur	56,52	Sur	36	32	11,18	sonido, telón, videobeam, PC	Si	Aula
4	404	Sur	27,77	Sur	3	16	11,67	mesa ovalada + 16 sillas	Si	Salón Posgrado
4	401	Sur	154,13	Sur-(Norte-palmera)	-	-	11,03	-	Si	Investigaciones
4	402	Sur	55,94	Sur	26	40	11,30	sonido, telón, videobeam, PC	No	Aula
4	Pasillo	Interno	24,89	sur-palmera	-	5	16,55	-	No	Pasillo/circulación
4	Coordinador Asistencia	Interno	9,07	-	-	3	14,99	-	No	Coordinador
4	Archivo	Interno	14,15	-	-	1	14,42	-	No	Archivo
4	Auxiliares	Oriente-Sur Interno	29,71	sur-palmera	-	3	13,73	-	No	Auxiliares
4	Baño Direccion	Oriente-Sur Interno	7,63	-	-	1	13,64	-	No	Baño
4	Coordinador	Sur-Interno	10,19	sur-palmera	-	2	13,35	-	No	Coordinador
4	Coordinador	Sur-Interno	10,52	sur-palmera	-	2	12,93	-	No	Coordinador
4	Alianza Industrial	Occidente-Interno	10,78	Occidente-interno	-	2	12,62	-	No	Revista
4	410	Norte	21,84	Norte	-	10	12,45	-	No	Secretaria
4	408	Nor-occidente	66,20	Norte- (Sur-inteno)	-	39	12,33	-	No	maestría
4	409	Norte	82,16	Norte	-	39	11,59	-	No	Posgrado
4	Baño Coordinador	Sur-Interno	4,61	Sur	-	1	11,27	-	No	Baño
4	Cafeteria	Interno	5,25	-	-	1	20,00	-	No	Cafeteria
4	Pasillo P4	Interno	194,80	-	-	10	8,28	-	No	Pasillo/circulación
4	Room	Sur-Occidente	50,99	Sur	-	35	8,00	-	No	Pasillo/circulación
4	415	Nor-oriente	87,70	Norte	-	39	7,21	-	No	Direccion
4	Baño M P4	Norte	15,28	Norte	-	5	6,81	-	No	Baño
4	Baño H P4	Norte	15,58	Norte	-	3	6,68	-	No	Baño
5	Aula 501	SurEste	77,63	Sur - Norte (interno)	No definido	35	8,35	-	Si	Clase
5	Aula 506	Sur -	63,54	Sur	No	35	9,95	-	Si	Clase

		Norte (interno)			definido					
5	Aula 502	Sur	59,18	Sur	-	35	10,95	-	Si	Clase
5	Aula 510	Norte	45,90	Norte	-	30	9,41	-	Si	Clase
5	Aula 504	Sur - Norte (interno)	57,34	Sur	-	35	7,53	-	Si	Clase
5	Aula 505	Sur - Norte (interno)	62,06	Sur	-	39	6,96	-	Si	Clase
5	Aula 508	NorOeste	66,61	Norte	No definido	35	9,73	-	No	Clase
5	Baño Hombres	Norte	15,57	Norte	-	2	6,68	-	No	Baño
5	Baño Mujeres	Norte	15,58	Norte	-	5	6,68	-	No	Baño
5	Cafetería	Oeste (Interno)	8,17	Oeste (Interno)	-	1	18,61	-	No	Cafetería
5	Pasillo	Central	213,80	Tiene vacíos	-	15	5,84	-	No	Pasillo/Circulación
5	Aula 503	Sur	54,83	Sur - Tiene balcón	-	32	3,79	-	No	Clase
5	Aula 509	Norte	57,60	Norte - Sur (interno)	-	32	7,50	-	No	Clase
5	Escaleras	Interno	20,71	-	-	10	2,51	-	No	Escaleras/Circulación
5	515 - Auditorio Enrique D.	NorEste	201,24	Norte - Sur (interno)	-	180	0,00	-	No	Auditorio
5	Ascensor	Interno	5,84	-	-	0	0,00	-	No	Ascensor
5	Aseo	Interno	2,35	-	-	1	0,00	-	No	Almacén
5	Cuarto	Interno	5,95	-	-	1	0,00	-	No	Almacén

ANEXO R. Simulaciones de grados hora de disconfort en zonas seleccionadas del EEEIE

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones de grados hora de disconfort en las zonas preseleccionadas: Sala de Computo, Centro de Estudios, Salón Excelencia, Acceso Principal, Aula 304, Aula 307 y Aula 515

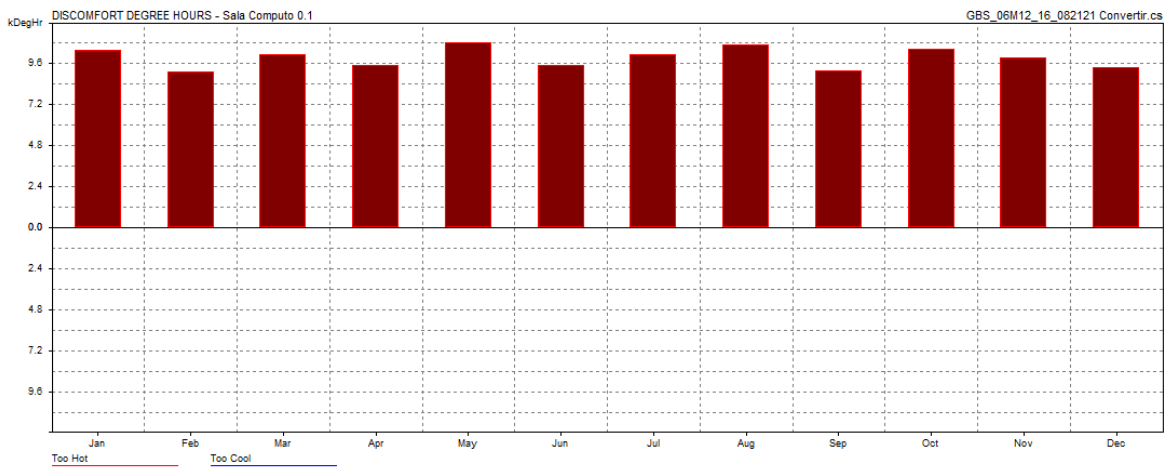


Figura R.1 Grados horas de disconfort de la sala de computo.

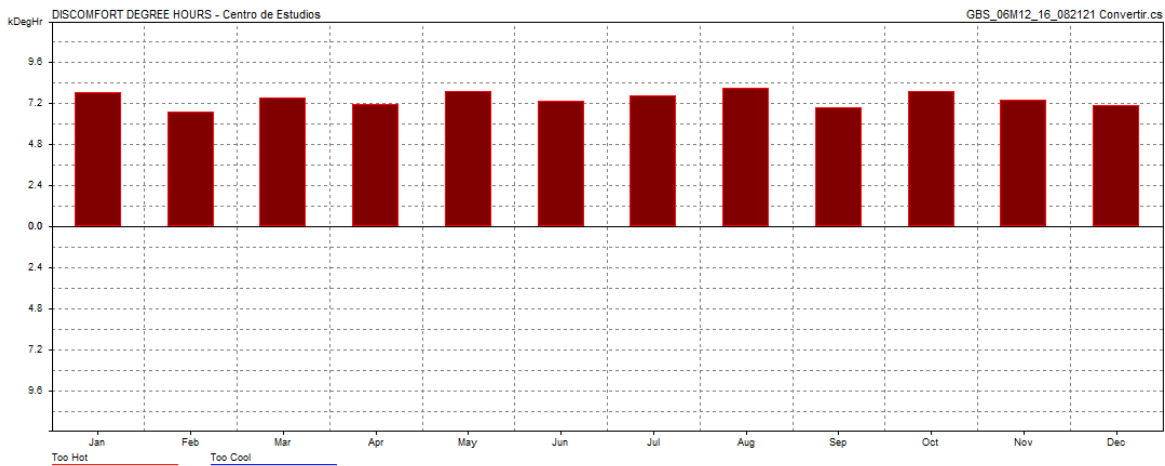


Figura R.2. Grados horas de disconfort Centro de estudios.

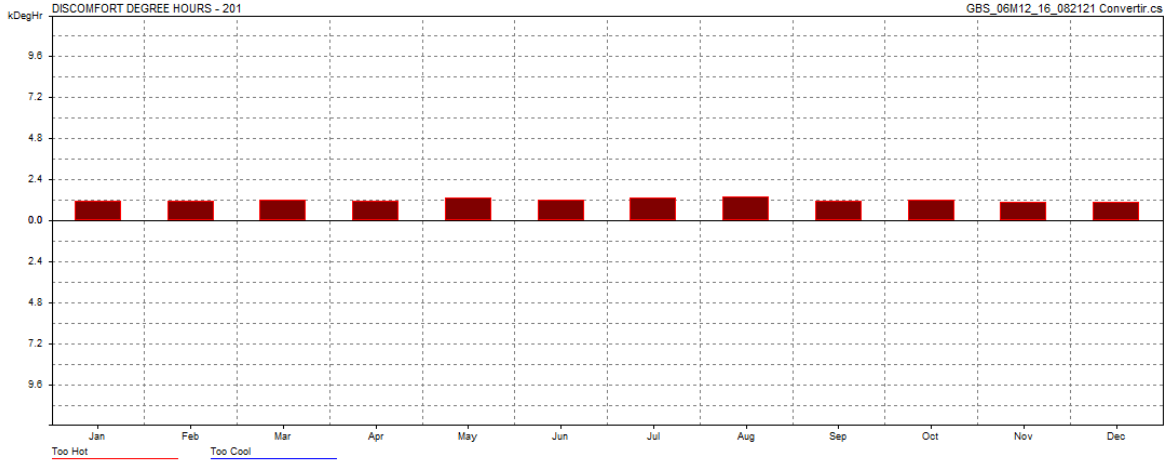


Figura R.3 Grados horas de disconfort Salón Excelencia (103).

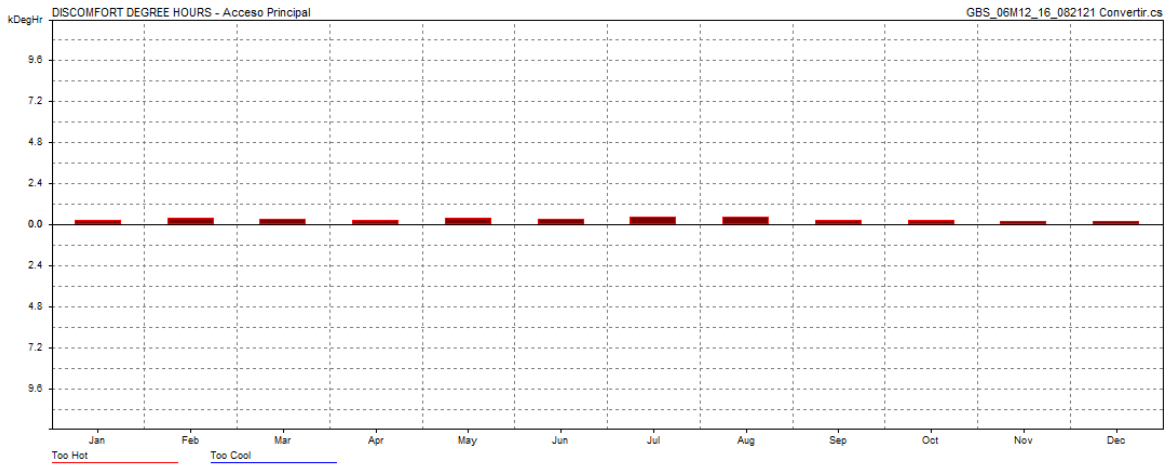


Figura R.4 Grados horas de disconfort Acceso Principal.

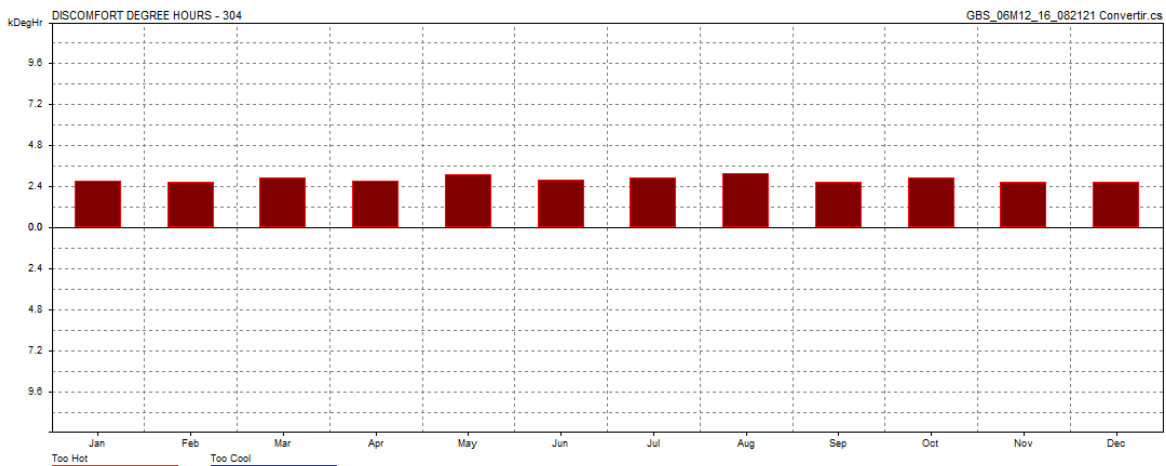


Figura R.5 Grados horas de disconfort Aula 304.

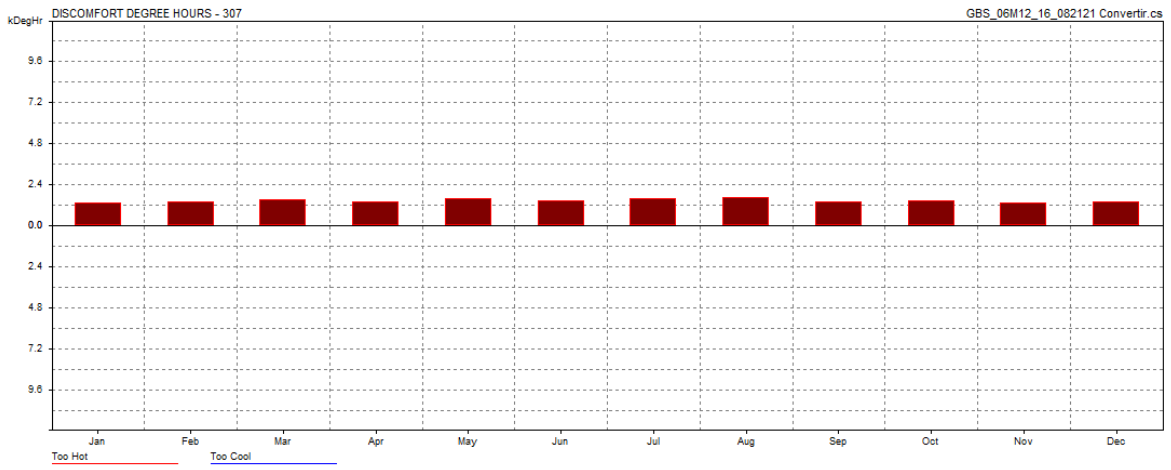


Figura R.6 Grados horas de disconfort Aula 307.

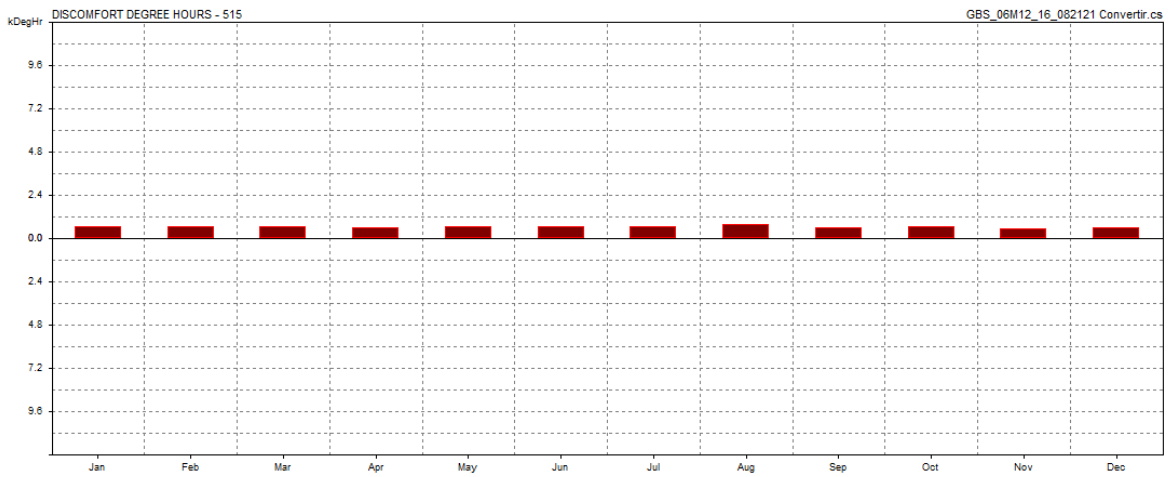


Figura R.7 Grados horas de disconfort Aula 515.

ANEXO S. Simulaciones de ganancias individuales

A continuación se muestran los resultados tabulados de las simulaciones de ganancias individuales anuales para los espacios preseleccionados del EEEIE

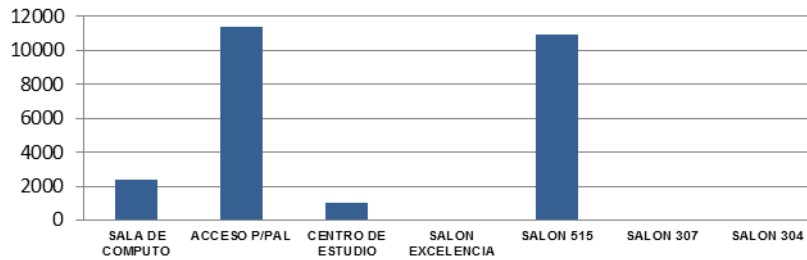


Figura S.1. Ganancias directas [W] en los espacios preseleccionados.

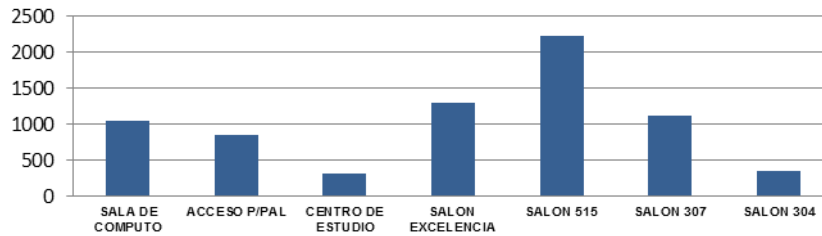


Figura S.2. Ganancias indirectas [W] en los espacios preseleccionados.

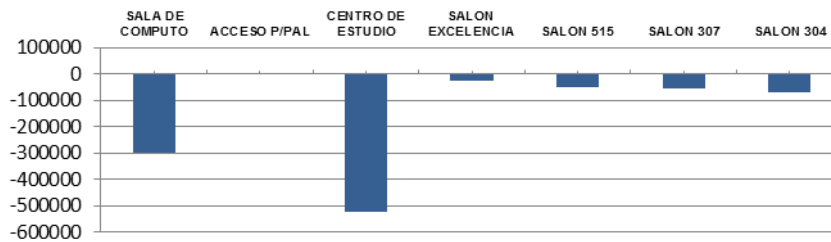


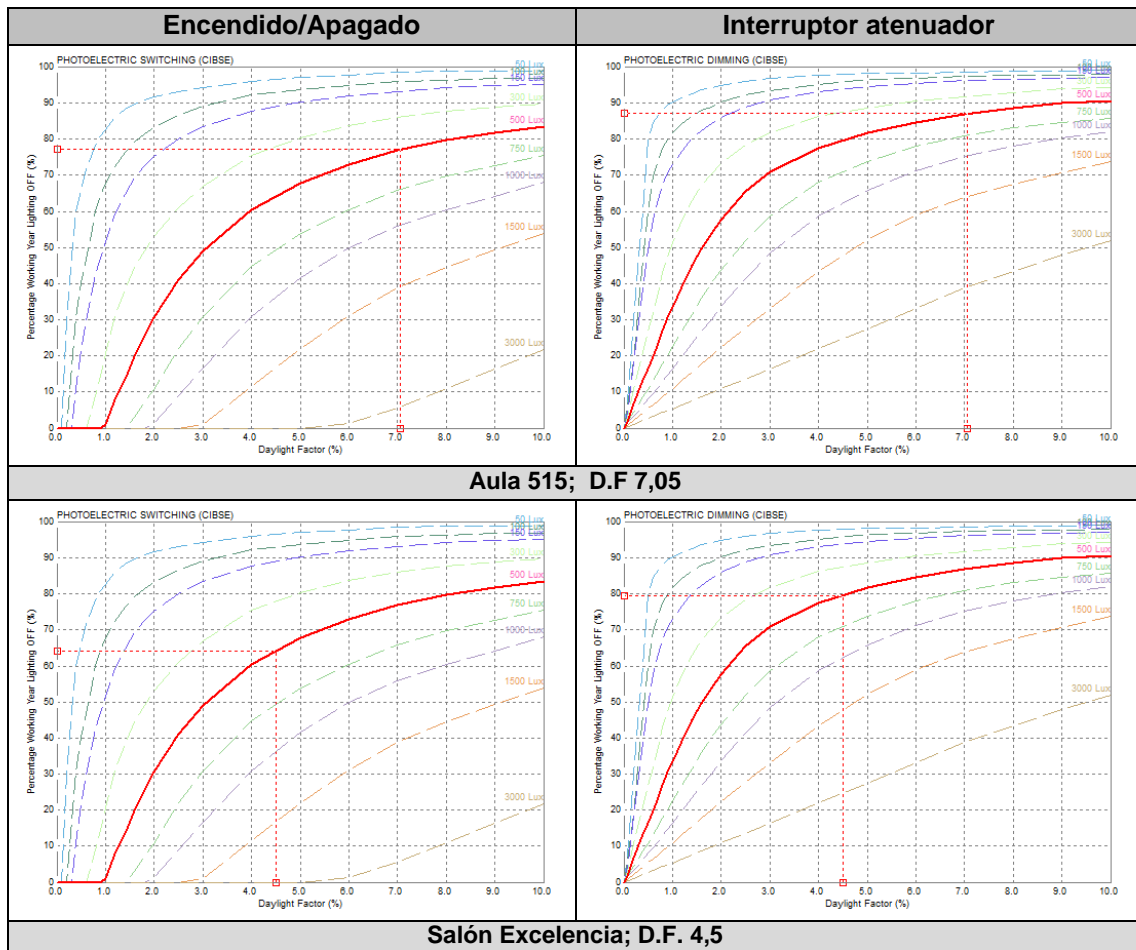
Figura S.3 Ganancias inter-zonas [W] en los espacios preseleccionados.

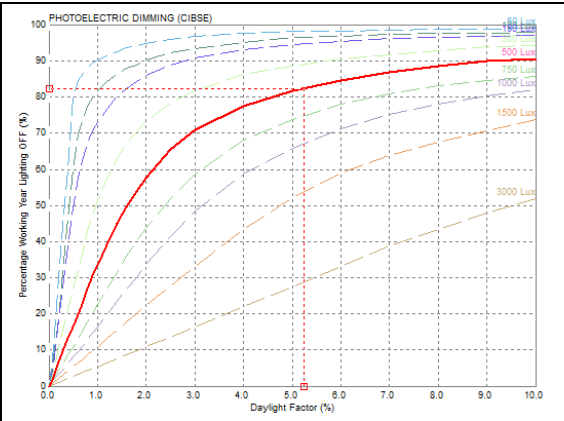
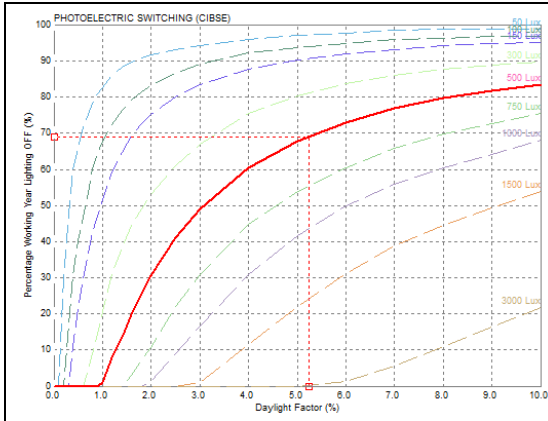


Figura S.4 Ganancias por materiales [W] en los espacios preseleccionados.

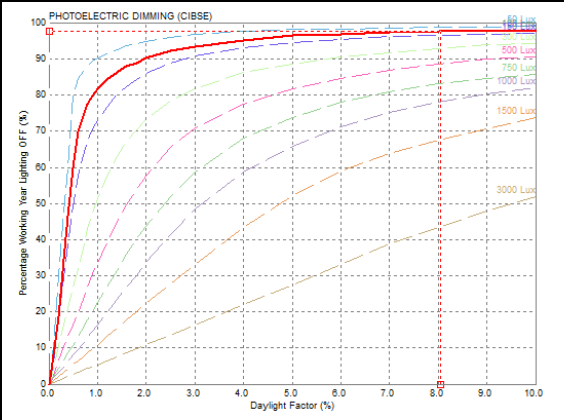
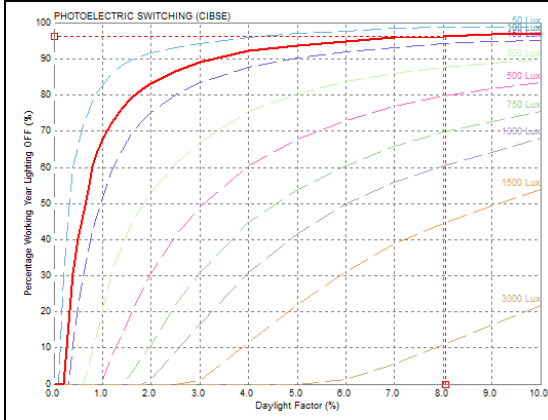
ANEXO T. Simulaciones de iluminación natural. Determinación del *Daylight Factor*

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones arrojadas por *Autodesk Ecotect Analysis*, utilizando el sistema de control Encendido/Apagado e Interruptor atenuador para cada uno de los espacios preseleccionados.

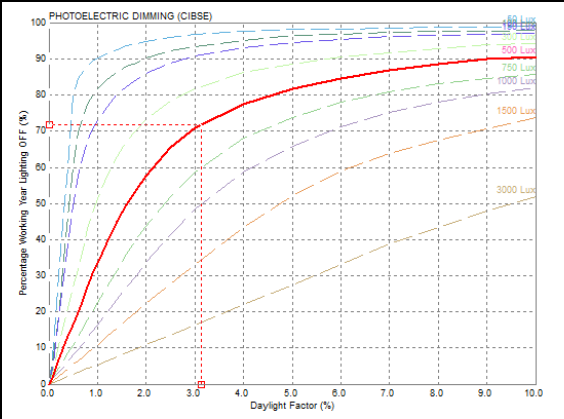
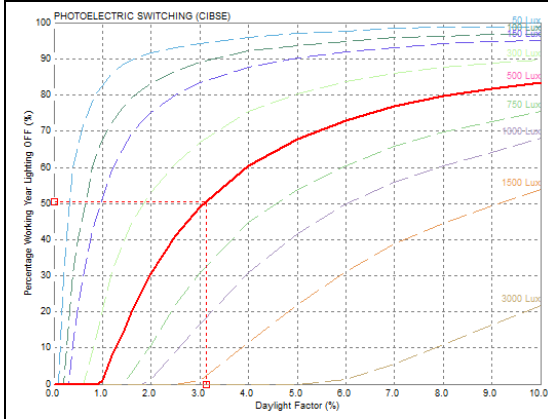




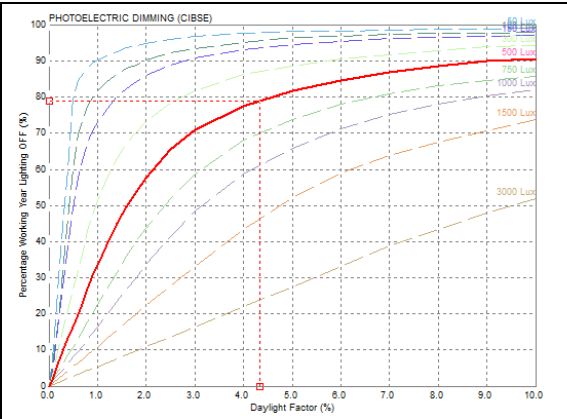
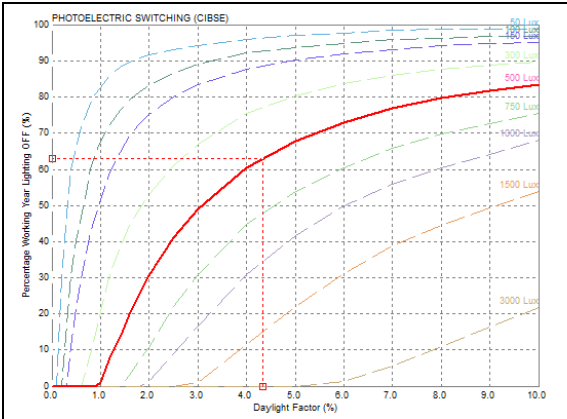
Aula 307; D.F 5,25



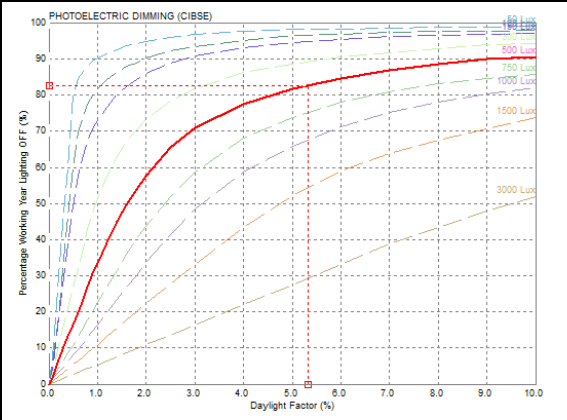
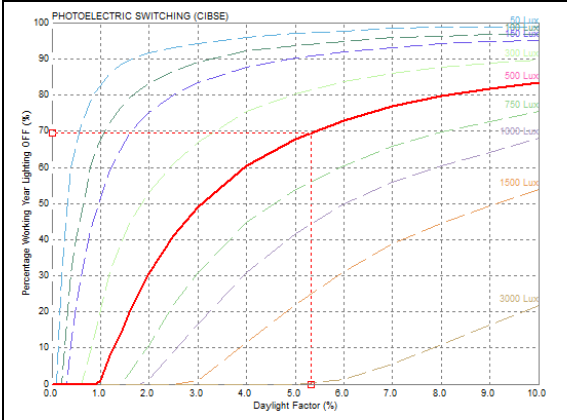
Acceso principal; D.F 8,08



Centro de estudios; D.F 3.14



Sala de computo; D.F 4.33



Aula 304; D.F 5.32