

**APLICACIÓN DEL ENERGY PLUS EN EL REDISEÑO BIOCLIMATICO DEL EDIFICIO
301 DE LA U. DEL VALLE**

MARIA FERNANDA IDARRAGA BASTIDAS

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

**APLICACIÓN DEL ENERGY PLUS EN EL REDISEÑO BIOCLIMATICO DEL EDIFICIO
301 DE LA U. DEL VALLE**

MARIA FERNANDA IDARRAGA BASTIDAS

**Proyecto de grado para optar por el título de:
Ingeniera Mecánica**

**Director:
Ing. Carlos Alberto Herrera Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

Nota de aceptación:

Firma del presidente de aprobadores

Firma del aprobador

Firma del aprobador

Santiago de Cali (6, 09, 2012)

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por el hecho de permitirme estar en todas mis facultades para culminar mis estudios universitarios y por la familia que me ha dado. A mis padres por su paciencia y comprensión, a Luis Carlos Villarejo por su apoyo incondicional y mis amigos Ingrid Marcela Padilla, Oscar Gerardo Castro y Juana María Jiménez por sus consejos y por la amistad que se tejó a lo largo de mi paso por la Universidad, al profesor Carlos Herrera por darme la oportunidad de trabajar con él y facilitarme los recursos para poder llevar a cabo este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.1.1 Objetivos Específicos	15
2. CLIMATIZACIÓN PASIVA.....	16
2.1 TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO PASIVO.....	16
2.1.1 Control del Sol y protección del calor.....	17
2.1.2 Modulación del calor.....	18
2.1.3 Disipación del calor y enfriamiento hibrido.....	18
2.2 CONFORT TÉRMICO.....	20
3. CALCULO DE LA CARGA TERMICA	24
3.1.1 Incidencia del Sol:	24
3.1.2 Cargas de calor al interior de la envolvente	31
3.2 ENERGY PLUS	32
3.2.1 Datos de entrada.....	32
3.2.2 Datos de salida.....	33
4. EDIFICIO OBJETO DE ESTUDIO.....	34
4.1 DESCRIPCIÓN.....	34
4.2 UBICACIÓN Y REGION CLIMATICA.....	37
5. MEDICIONES E INDICE DE FANGER	42
5.1 HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA DE BULBO SECO.....	42
5.1.1 Mediciones en la Oficina Editorial	42
5.1.2 Mediciones en la Oficina de Gestión Documental	43
5.2 VELOCIDAD DEL AIRE	44

5.2.1	Mediciones en la Oficina Editorial	45
5.2.2	Mediciones en la Oficina de Gestión Documental	46
5.3	TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE	46
5.4	INDICE DE FANGER.....	47
6.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	49
6.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	49
6.2	ÁNGULOS SOLARES	50
6.3	ANÁLISIS DE GANANCIA SOLAR	52
6.4	ANÁLISIS DE GANANCIA SOLAR SOBRE LAS VENTANAS	53
6.5	ANÁLISIS DE GANANCIA SOLAR SOBRE LA ENVOLVENTE.....	54
6.6	COMPARACION DE RESULTADOS (VALIDACION Vs. ENERGY PLUS).....	56
7.	SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	58
7.1	MODELO COMPUTACIONAL	58
7.1.1	Ubicación.....	58
7.1.2	Datos del fichero climático	59
7.1.3	Configuración	65
7.1.4	Ocupación del edificio.....	68
7.1.5	Materiales.....	69
7.1.6	Resultados	69
8.	TÉCNICAS PASIVAS.....	87
8.1	OBSERVACIONES AL EDIFICIO 301	87
8.2	MODULACION DE CALOR	88
8.3	PROTECCION SOLAR.....	89
9.	CONCLUSIONES	95
10.	BIBLIOGRAFÍA	¡Error! Marcador no definido.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2-1: Relación entre el PMV y el PPD [4].....	23
Figura 3-1: Lectura de ángulos solares. a) Carta solar, b) Mapa estereográfico [5]	25
Figura 3-2: Ángulos solares	26
Figura 4-1: Edificio de Administración Central.....	34
Figura 4-2: Vista en Planta del primer piso	35
Figura 4-3: Vista en planta del segundo piso	35
Figura 4-4: Vista en planta del tercer piso.....	35
Figura 4-5: Vista en planta del cuarto piso	36
Figura 4-6: Vista lateral izquierda del Edificio 301.....	36
Figura 4-7: Vista lateral derecha del Edificio 301	36
Figura 4-8: Vista sur del Edificio 301.....	37
Figura 4-9: Vista norte del edificio 301	37
Figura 4-10: Ubicación de la Universidad del Valle (10)	38
Figura 4-11: Clima de la ciudad de Cali [11]	38
Figura 4-12: Temperatura de la ciudad de Cali [11]	39
Figura 4-13: Humedad relativa media en Cali, a) promedio durante el año; b) en un día normal y caluroso [11].....	39
Figura 4-14: Rosa de los vientos de la Estación Meléndez de CENICAÑA	41
4-15: Radiación Solar Global. [13]	41
Figura 5-1: Sensor de humedad relativa y temperatura de bulbo seco Marca EXTECH - modelo RHT10 [14].....	42
Figura 5-2: % Humedad relativa y Temperatura de bulbo seco. Oficina Editorial	43
Figura 5-3: % Humedad relativa y Temperatura de bulbo seco. Oficina Gestión Documental	44
Figura 5-4: Velocímetro, marca TSI - modelo 5725 [15].....	45
Figura 5-5: Velocidad del viento. Oficina Editorial	45
Figura 5-6: Velocidad del viento. Oficina de Gestión Documental	46
Figura 6-1: Modelo Computacional	50
Figura 6-2: Orientación del Sol respecto al modelo computacional. a) Hora 12:00 p.m, b) Hora: 3:00 p.m. pared oeste, c) Hora: 3:00 p.m. pared este.....	51

Figura 6-3: Diagrama de Resistencias en el modelo	54
Figura 7-1: Modelo computacional	58
Figura 7-2: Mapa solar para la latitud 3,55°N.....	59
Figura 7-3: Radiación solar normal directa y Temperatura de bulbo seco en marzo de 2002 a las 12.00 pm	61
Figura 7-4: Radiación solar directa y temperatura de bulbo seco Cali, 31 de marzo de 2002	63
Figura 7-5: Orientación del Sol respecto al Edificio 301. Hora: 12:00 p.m.....	64
Figura 7-6: Orientación del Sol respecto al Edificio 301. Hora: 3:00 p.m.....	64
Figura 7-7: Clasificación de las zonas térmicas del edificio. a) 1º Piso oeste, b) 1º Piso este, c) 2º Piso.....	66
Figura 7-8: Clasificación de las zonas térmicas del edificio. A) 3º Piso oeste, B) 4º Piso .	67
Figura 7-9: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior. Primer piso <i>lado este</i> , a) Oficina A, b) Oficina B.....	70
Figura 7-10: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Primer piso <i>lado oeste</i> , a) Oficina A, b) Oficina B, c) Oficina C, d) Oficina D	71
Figura 7-11: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Segundo piso <i>lado norte</i> , a) Oficina A, b) Oficina B, c) Oficina C, d) Oficina D	72
Figura 7-12: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Segundo piso <i>lado sur</i> , a) Oficina B, b) Oficina C.	72
Figura 7-13: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Tercer piso.....	73
Figura 7-14: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Cuarto piso.....	73
Figura 7-15: % Humedad Relativa e Índice de Fanger. Primer piso <i>lado este</i> , a) Oficina A, b) Oficina B.....	74
Figura 7-16: % Humedad Relativa e Índice de Fanger. Primer piso <i>lado oeste</i> , a) Oficina A, b) Oficina B.....	75
Figura 7-17: % Humedad Relativa e Índice de Fanger. Segundo piso <i>lado norte</i> , a) Oficina A, b) Oficina B.....	77
Figura 7-18: % Humedad Relativa e Índice de Fanger. Segundo piso <i>lado sur</i> , a) Oficina B b) Oficina C.....	77
Figura 7-19: % Humedad Relativa e Índice de Fanger. Tercer piso.	78

Figura 7-20: % Humedad Relativa e Índice de Fanger. Cuarto piso.....	78
Figura 7-21: Ganancia térmica de la envolvente. Primer piso <i>lado este</i> , a) Oficina A, b) Oficina B.....	79
Figura 7-22: Ganancia térmica de la envolvente. Primer piso <i>lado oeste</i> , a) Oficina A, b) Oficina B, c) Oficina C, d) Oficina D.	80
Figura 7-23: Ganancia térmica de la envolvente. Segundo piso <i>lado norte</i>	82
Figura 7-24: Ganancia térmica de la envolvente. Segundo piso <i>lado sur</i> , a) Oficina B, b) Oficina C.....	82
Figura 7-25: Ganancia térmica de la envolvente. Tercer piso.	83
Figura 7-26: Ganancia térmica de la envolvente. Cuarto piso.	83
Figura 7-27: Mapa de la iluminación natural del 1º piso este	84
Figura 7-28: Mapa de la iluminación natural del 1º piso oeste	84
Figura 7-29: Mapa de la iluminación natural del 2º piso	85
Figura 7-30: Mapa de la iluminación natural del 3º piso	85
Figura 7-31: Mapa de la iluminación natural del 4º piso	86
Figura 8-1: Temperatura radiante, modelo pasivo vs. Original, 1º piso este.....	88
Figura 8-2: Mapa estereográfico, latitud 3.55 N, marzo 31.....	89
Figura 8-3: Sombras en el Edificio 301, marzo 31, a) 9 hrs y b) 15 hrs	90
Figura 8-4: Dimensionamiento de voladizo y lateral [16]	91
Figura 8-5: Sombreamiento del Edificio 301, a) 9 horas y b) 15 horas	93
Figura 8-6: Sombreamiento con voladizo a) sin voladizo, b) con voladizos, c) incidencia del Sol sin voladizo, d) incidencia del Sol con voladizos	94

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2-1: Factores que inciden sobre el confort térmico	21
Tabla 2-2: Escala de sensación térmica según Fanger [3]	22
Tabla 3-1: Radiación solar extraterrestre [6]	28
Tabla 3-2: Ecuaciones para el cálculo de los distintos tipos de radiación solar	28
Tabla 3-3 Coeficiente de sombra y Transmisión solar para algunos tipos de vidrio [8]	30
Tabla 3-4: Niveles típicos recomendados de iluminancia [9]	31
Tabla 4-1: Vientos de la Estación Meléndez [12]	40
Tabla 5-1: Temperatura superficial de las paredes Oficina Editorial	47
Tabla 5-2: Temperatura superficial de las paredes Oficina Gestión Documental.	47
Tabla 5-3: Cálculo Índice de Fanger. Oficina Gestión Documental	48
Tabla 5-4: Calculo Índice de Fanger. Oficina Editorial	48
Tabla 6-1: Datos de clima y geometría solar para las 12:00 p.m. y las 3:00 p.m.	49
Tabla 6-2: Propiedades térmicas de los materiales del modelo	50
Tabla 6-3: Resultados de las ecuaciones 6-1 y 6-2	52
Tabla 6-4: Resultados de las ecuaciones 6-3, 6-4 y 6-5	53
Tabla 6-5: Resultados de las ecuaciones 6-6, 6-7 y 6-8	53
Tabla 6-6: Resultados de la ecuación 6-9	54
Tabla 6-7: Resistencia térmica del sistema constructivo del modelo (8)	55
Tabla 6-8: Resultados de la ecuación 6-10	55
Tabla 6-9: Resultados de la ecuación 6-11	56
Tabla 6-10: Comparación de resultados, validación teórica vs. Energy Plus	56
Tabla 7-1: Fichero del Clima para la ciudad de Cali en marzo de 2002 - 12:00 p.m.	60
Tabla 7-2: Fichero del Clima para la ciudad de Cali en marzo 31 de 2002	62
Tabla 7-3: Densidad de personal y carga térmica debido a computadores e iluminación.	68
Tabla 7-4: Factores “humanos” incidentes en el confort térmico	68
Tabla 7-5: Sistema constructivo del Edificio 301	69
Tabla 8-1: Materiales de la envolvente	88
Tabla 8-2: Dimensionamiento de voladizo y laterales	92

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A. GANANCIA DE CALOR DE ACUERDO AL NIVEL DE ACTIVIDAD DE LOS OCUPANTES	99
ANEXO B. EFICIENCIA DE LOS DISTINTOS TIPOS DE ILUMINACION.....	100

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad demostrar la eficacia del software Enegy Plus, mediante la simulación de las ganancias térmicas sobre el Edificio 301 de la Universidad del Valle

Se llega a la conclusión de que el software no es del todo asertivo para la simulación térmica debido a que él depende de datos que otorga una estación meteorológica. El factor más relevante a la hora de simular es la temperatura de bulbo seco exterior, ya que si se llega a correr el software sin tener en cuenta esta variable, los resultados no son los esperados, como es el caso del Índice de Fanger, ya que una temperatura baja, para el caso de la ciudad de Cali, arrojaría como respuesta, una aparente confortabilidad. Otra variable de gran importancia es la radiación solar, debido a que esta es medida más no calculada, es decir, depende del estado del clima, por ello esta radiación no representa la realidad esperada a lo que se refiere al clima de Cali si esta fuese calculada.

Para este proyecto se tuvo la intención de simular el edificio en equinoccio y/o solsticio pero al ver que la radiación y la temperatura de bulbo seco eran muy bajas, en respuesta al clima de esa fecha, ya sea que estuvo nublado o lluvioso, se toma la decisión de fijar nuestra fecha de simulación de acuerdo a la temperatura de bulbo seco y radiación solar directa.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las edificaciones consumen alrededor de un 50% de energía eléctrica, de la cual, un 46% se utiliza para climatizar (calefacción/refrigeración), siendo esta el área de mayor consumo, y por ende la importancia en reducir esta cifra.

Los equipos de aire acondicionado, son los que más consumen energía, por ende la problemática que se vive actualmente con estos equipos es el consumo indiscriminado de energía eléctrica ya que agrava el problema del calentamiento global.

Para lograr la reducción del consumo de energía, se debe empezar desde la etapa de diseño; esto se puede manifestar en que el edificio tenga en cuenta el clima: su orientación y distribución, de esta manera se aprovecha la luz y el fresco que el ambiente brinda, buen aislamiento, fachadas con colores claros, contorno con vegetación y de elementos de agua, que posea sistemas de protección solar (como toldos, persianas, voladizos o aleros), que utilice materiales poco emisivos, etc., de esta manera se optimiza el consumo de energía eléctrica. A pesar de lo nombrado anteriormente, puede ser que el calor siga resultando molesto, por lo es necesario utilizar algún dispositivo mecánico. Hay otros sistemas que consumen menos electricidad que el aire acondicionado, como los ventiladores, los cuales al mover el aire disminuyen la sensación de calor (entre unos 3 y 5 °C), más que suficientes en muchas ocasiones. Otra opción económica, sobre todo para zonas secas, son los sistemas evaporativos, que consiguen humedecer y enfriar el aire en varios grados; factibles si la humedad relativa es baja [1].

El edificio de Administración central de la Universidad del Valle, fue diseñado y construido en los años 60, libre de sistemas de aire acondicionado y con aberturas apropiadas para su climatización pasiva, que solo en muy pocas ocasiones resultaba en inconfortabilidad. Actualmente el edificio de Administración fue completamente reformado internamente con nueva distribución y cerramientos, no proyectado sosteniblemente y que terminaron truncando las corrientes pasivas de climatización y, por ende, la climatización pasiva se afectó. Hoy en día utiliza una alta cantidad de equipos de aire acondicionado, causando un alto consumo de energía. Dado que es un hecho la nueva disposición del edificio,

resulta interesante explorar la posibilidad de recuperar y reducir la carga térmica mediante técnicas pasivas sostenibles, con la visión de disminuir el consumo energético y aprovechar lo que el ambiente ofrece.

El presente trabajo pretende diagnosticar la confortabilidad típica en una zona representativa, analizar la eficiencia del diseño arquitectónico y proyecta y evaluar, mediante simulación (Energy Plus), unas mejoras con técnicas pasivas sostenibles.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicar el simulador Energy Plus en el rediseño bioclimático de la climatización del edificio de Administración Central de la Universidad del Valle.

1.1.1 Objetivos Específicos

1. Medir y diagnosticar el nivel de confortabilidad (Índice de Fanger) de las oficinas que no poseen aire acondicionado del edificio.
2. Validar el resultado arrojado por Energy Plus de la ganancia solar de la envolvente (ventanas, paredes y techo) a través de un análisis teórico por medio de un modelo básico.
3. Modelar la climatización, iluminación y ventilación y otros flujos de energía a través del software Energy Plus, y realizar un análisis crítico del sistema actual.
4. Proyectar unas mejoras pasivas y su efecto.

2. CLIMATIZACIÓN PASIVA

Para lograr el bienestar térmico se puede utilizar: equipos mecánicos, como calefactores, sistemas de aire acondicionado, ventiladores, etc., o hacer uso de lo que provee el ambiente como es la ventilación natural, la radiación solar, la humedad; como también ser recursivos para evadir o conseguir calor. El primer grupo es a lo que se le llama *técnicas activas* y el segundo ***técnicas pasivas***, es decir, que es prescindible de los equipos mecánicos.

Como se ha explicado en este documento una gran falla de los equipos mecánicos, además de su costo, es su gran consumo de energía eléctrica y por ende su desfavorable impacto ambiental, en el caso del aire acondicionado sus inconvenientes son: el gran consumo de electricidad, la calidad de aire que proporciona y los estragos climáticos que hoy en día se evidencian como son el agotamiento de la capa de ozono y el calentamiento global. [2]

2.1 TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO PASIVO

Los sistemas de refrigeración pasiva se pueden clasificar en tres principales grupos:

- a) **Técnicas de protección solar y del calor:** Se involucran el paisajismo, espacios y semi-espacios al aire libre, forma de la construcción, disposición y acabado exterior, control solar, sombras sobre la superficie del edificio, aislamiento térmico, control de ganancias internas, etc.
- b) **Técnicas de modulación del calor:** Se ocupa de la capacidad de almacenamiento de la estructura del edificio de almacenar calor. Cuanto mayor sea la temperatura exterior, más importante el efecto de la capacidad de almacenamiento. El ciclo de carga y descarga de calor se debe combinar con los principios de disipación de calor, como ventilación nocturna, de modo que la fase de descarga no agregue al sobrecalentamiento.

c) Técnicas de disipación de calor: Estas técnicas se ocupan del potencial para eliminar el exceso de calor del edificio a un sumidero de más baja temperatura. La disipación del exceso de calor depende de dos principales condiciones:

1. La disposición de un sumidero de calor ambiental adecuado
2. El establecimiento de un acoplamiento térmico adecuado entre el edificio y el sumidero, así como las diferencias de temperatura suficientes para la transferencia de calor.

Las principales técnicas de disipación de calor son: enfriamiento del suelo basado en el uso de la tierra, y enfriamiento evaporativo y convectivo, utilizando el agua y el aire, respectivamente como sumidero. El potencial de las técnicas de disipación de calor depende fuertemente de las condiciones climáticas. Cuando la transferencia de calor es asistida por dispositivos mecánicos se hace referencia al enfriamiento híbrido.

2.1.1 Control del Sol y protección del calor

El control solar se ocupa de la reducción permanente o temporal de la transmisión de radiación solar. En el enfriamiento de climas los dispositivos de control solar deben reducir al máximo las ganancias solares y a la vez admitir suficiente luz del día y contacto visual con el exterior. Esto se puede lograr ya sea con la combinación de una ventana con un dispositivo de sombra interno o externo o usando vidrios de transmitancia variable (vidrio conmutable). El rendimiento global del control solar de una ventana se expresa se expresa en términos de g el cual es el valor de la suma de la radiación solar transmitida y del resultado de las ganancias de calor de la luz solar absorbida en la unidad de acristalamiento. Ejemplo de todo esto son el vidrio conmutable y el electrocrómico. Los componentes multifuncionales de una fachada son capaces de proporcionar ventilación, luz natural y control solar.

La protección del calor de un edificio tiene que ver principalmente con el flujo de calor entre el medio ambiente y el edificio. Durante los últimos años grandes mejoras se han logrado respecto a la calidad térmica de los elementos transparentes. Vidrio recubierto de

baja emisividad, ventanas llenas con gas noble, ventanas de triple acristalamiento, y aislamiento transparente.

2.1.2 Modulación del calor

Una manera diferente de reducir la temperatura del aire interior y los picos de carga de enfriamiento, es almacenar el exceso de calor en los materiales estructurales del edificio, esto es lo que se conoce como *masa térmica*. Construido de material con alta capacidad calorífica, como el hormigón vertido, ladrillos y azulejos, que suelen encontrarse en paredes, particiones, techos y pisos.

La tasa de transferencia de calor a través de los materiales de construcción y la eficacia de la masa térmica se determina por un número de parámetros y condiciones. La optimización de los niveles de masa térmica depende de las propiedades de los materiales de construcción, la orientación del edificio, el aislamiento térmico, la ventilación, las condiciones climáticas, el uso de sistemas auxiliares de enfriamiento, y los patrones de ocupación. Para que el material de la pared almacene calor eficazmente, debe tener alta capacidad térmica y alto valor conductivo, por lo que el calor puede penetrar a través de la pared durante los periodos de carga y descarga de calor.

2.1.3 Disipación del calor y enfriamiento híbrido

Las técnicas de disipación de calor se basan en la transferencia de calor del exceso de calor de un edificio hacia un sumidero de baja temperatura ambiente. Los principales sumideros son el aire ambiente, el agua, el suelo y el cielo. Cuando el calor se disipa al aire ambiente, la técnica se conoce como *enfriamiento convectivo*, cuando se usa el agua el proceso se conoce como *enfriamiento evaporativo*, cuando el suelo o el cielo se usan se conoce como *suelo y enfriamiento radiativo*, respectivamente.

El enfriamiento convectivo por medio de la ventilación es un método muy efectivo para mejorar el confort interno, la calidad del aire interna y reducir la temperatura. Una mayor velocidad del aire dentro del edificio puede aumentar el confort térmico cuando no se

excede ciertos valores. La técnica se limita a la ventilación nocturna sin embargo en horas del día la ventilación se puede usar cuando la temperatura del aire es más baja que la temperatura interna.

El enfriamiento convectivo puede ser natural, mecánico o híbrido. La ventilación Natural se debe ya sea a las fuerzas del viento, a las diferencias de temperatura o a ambas. Una seria reducción del potencial de enfriamiento se observa en ambientes urbanos densos como resultado de una dramática reducción de la velocidad del viento en las ciudades. El posicionamiento cuidadoso de las aberturas en edificios ventilados naturalmente es un crucial parámetro que determina la eficacia del proceso.

El enfriamiento evaporativo se aplica a todo el proceso en el cual el calor sensible en una corriente de aire se cambia por el calor latente de las gotas de agua o de superficies húmedas. Cabe anotar que este tipo de enfriamiento se aplica solo en climas secos, ya que de lo contrario, al aplicarlo a climas húmedos, el aire se condensa siendo este un efecto no deseado.

Durante el verano la temperatura del suelo es considerablemente más baja que la temperatura ambiente. Además, el suelo ofrece una importante oportunidad para la disipación del exceso de calor del edificio. Hay dos estrategias para usar el suelo.

- a) Enfriamiento a través de contacto directo con la tierra
- b) Enfriamiento a través de tuberías enterradas

El contacto con la Tierra ofrece a los edificios varias ventajas, es decir, infiltración limitada y pérdida de calor, protección del calor y el sol, reducción de ruido y vibración, protección de fuego y tormenta y mejor seguridad. Sin embargo no son libres de desventajas como la condensación, lenta respuesta para condiciones cambiantes, poca luz natural y baja calidad del aire interno.

El concepto de tuberías enterradas involucra el uso de tubos metálicos o de PVC. El aire ingresa por tubos donde se pre-enfría y luego se entrega al edificio. Cuando el aire externo se distribuye dentro de los tubos se dice que es un *sistema de lazo abierto*.

Cuando el aire interno se distribuye en el edificio a través de tubos, se dice que es un *sistema de lazo cerrado*. El desempeño de la tubería enterrada, está en función de la temperatura de entrada del aire, la temperatura del suelo, las características térmicas de la tubería y el suelo así como la velocidad del aire, la dimensión de la tubería y su respectiva profundidad. La aplicación de las tuberías enterradas en edificios ha revelado que los beneficios energéticos son muy importantes.

El enfriamiento pasivo se basa en la pérdida de calor a través de la emisión de radiación del edificio al cielo nocturno, el cual está a una temperatura más baja. Hay dos métodos de enfriamiento pasivo por medio de radiación: directo, o enfriamiento pasivo por radiación, y enfriamiento por radiación híbrida. En el primero, la envolvente del edificio irradia hacia el cielo y se enfría, produciendo una pérdida de calor desde el interior del edificio. Por razones físicas, la parte de la envolvente del edificio que más irradia es una cubierta plana. En el segundo caso, quien irradia no es la envolvente del edificio pero por lo general una placa de metal. El aire se enfría por circulación bajo el plato metálico antes de ser inyectado al edificio. Otros sistemas son la combinación de estas dos configuraciones. [2]

2.2 CONFORT TÉRMICO.

Según la norma ISO 7730, el confort térmico es *“la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico”*. La cantidad de calor que se genera y disipa del cuerpo humano depende de la actividad, la edad, talla corporal y género. La temperatura en la que se mantiene el cuerpo humano es de 37°C, independiente de las condiciones ambientales. Una persona se siente cómoda cuando las condiciones que el ambiente ofrece ayuda a conservar el balance térmico. Los factores que inciden en la variación del confort son [3]:

Tabla 2-1: Factores que inciden sobre el confort térmico

TIPO DE FACTOR		DEFINICION	UNIDAD	RANGO
PERSONAL	Nivel de actividad	Energía generada por el metabolismo de una persona, varía en función de la actividad que realiza. $1met=58.2 W/m^2$	<i>met</i>	0,8 - 4
	Características de la ropa	Aislamiento térmico de la vestimenta $1clo=0.155(m^2 \cdot ^\circ C)/W$	<i>clo</i>	0 - 2
AMBIENTAL	Temp. seca del aire	Temperatura de bulbo seco del aire circundante	$^\circ C$	10 - 40
	Humedad relativa	Humedad del aire	%	30 - 70
	Temp. radiante media	Temperatura de toda superficie que incida directamente sobre cualquier parte del cuerpo y que de esta manera puedan intercambiar radiación	$^\circ C$	10 - 40
	Velocidad relativa del aire	Velocidad del aire circundante	<i>m/s</i>	0 - 1

Lo anterior está fundamentado en la obra de Povl Ole Fanger “Thermal Confort”, recopilada por la norma ISO 7730. El método de Fanger calcula dos índices, basados en lo expuesto en la Tabla 2-1, los cuales son:

- a) **Voto medio estimado:** (*PMV-predicted mean vote*) es un índice que refleja el valor de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas respecto de una escala de *sensación térmica* de 7 niveles (*tabla 2-2*) basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano (la producción interna de calor del cuerpo es igual a su pérdida hacia el ambiente) prediciendo el valor medio de la sensación térmica. No obstante, los votos individuales se distribuirán alrededor de dicho valor medio, por lo que resulta útil estimar el **Porcentaje de personas insatisfechas** por notar demasiado frío o calor, es decir aquellas personas que considerarían la sensación térmica provocada por el entorno como desagradable.

b) Porcentaje de personas insatisfechas: (*PPD-predicted percentage dissatisfied*), los cuales aportan información clara y concisa sobre el ambiente térmico al evaluador. Los desarrollos ofrecidos por Fanger se basan en un muestreo sobre 1300 sujetos, y demuestran que el mejor resultado posible conlleva la insatisfacción del 5% del grupo, es decir, es imposible conseguir unas condiciones ideales en el mismo recinto para la totalidad de las personas. Incluyendo este parámetro en la tabla de “sensación térmica” se obtiene:

Tabla 2-2: Escala de sensación térmica según Fanger [3]

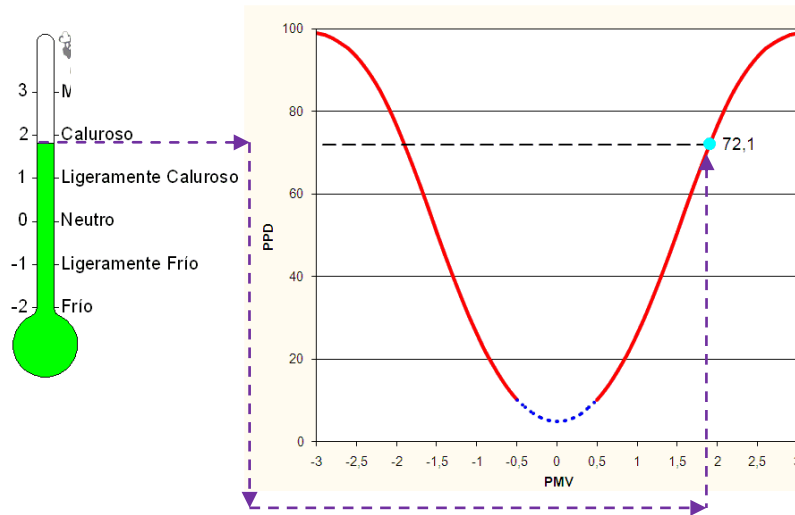
ESCALA DE SENSACION TERMICA		
PMV	PPD %	SENSACION
+3	99	Muy Caluroso
+2	77	Caluroso
+1	26	Ligeramente Caluroso
0	5	Confort (Neutro)
-1	26	Ligeramente Frío
-2	77	Frio
-3	99	Muy Frío

La relación entre el PMV y el PPD se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Expresada a través de la siguiente gráfica:

Figura 2-1: Relación entre el PMV y el PPD [4]



Como se observa en la Figura 2-1, el 72,1% (-PPD- *eje y*) de las personas encuestadas están inconfortables con el ambiente ya que la sensación térmica es cercana a 2 (-PMV- *eje x*), Ligeramente Caluroso. Para que se pueda decir que hay confort el PPD debe de estar entre 5% y 10%. Los valores mostrados se obtienen por medio de cálculos realizados a través de programas, las cuales tienen en cuenta los parámetros que inciden sobre el confort (Tabla 2-1)

3. CALCULO DE LA CARGA TERMICA

La carga térmica, hace referencia a la cantidad de calor recibido o generado, en este caso en la edificación, ya sea por el Sol, el cual es la principal fuente de calor, las personas que habitan en él, equipos de oficina, lámparas, entre otros. Con los cálculos de las cargas se busca determinar las condiciones óptimas para lograr el confort térmico, para el caso de este proyecto sería plantear los mecanismos para retirar o evadir el calor, el cual está determinado por una serie de condiciones ambientales y personales (los cuales se trataran en el siguiente numeral). El calor generado en la edificación puede variar de manera positiva, a favor de los ocupantes, dependiendo de las implementaciones que se hagan para dicho fin, estas pueden ser pasivas (a través de lo que el medio ambiente ofrece) ó activas (a través de equipos mecánicos), por esta razón antes de aplicar cualquiera de estas técnicas es importante realizar los cálculos pertinentes para evitar un sobredimensionamiento, debido a que en el caso de las implementaciones activas, esto significa un mayor consumo de electricidad. Por ello aplicando de una manera acertada las técnicas pasivas quizá se puede llegar a un bajo consumo de energía eléctrica debido a que se utiliza equipos de menor potencia o quizá se pueda prescindir de las técnicas activas.

3.1.1 Incidencia del Sol:

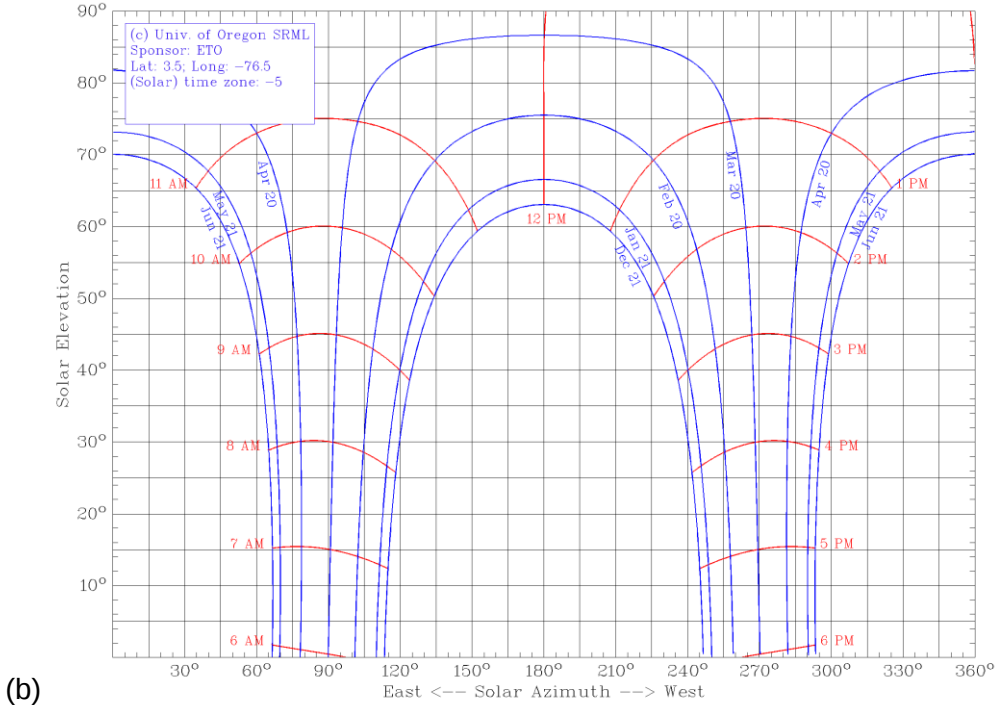
a) Ángulos solares:

Se debe de tener en cuenta la ubicación del edificio objeto de estudio, por medio de las coordenadas geográficas (latitud y longitud) ya que de ellas dependen la radiación solar incidente sobre el lugar como también su variación y junto con la fecha y hora, se determinan, por medio de una carta solar o un mapa estereográfico (figura 2-2 A y B), los siguientes ángulos solares:

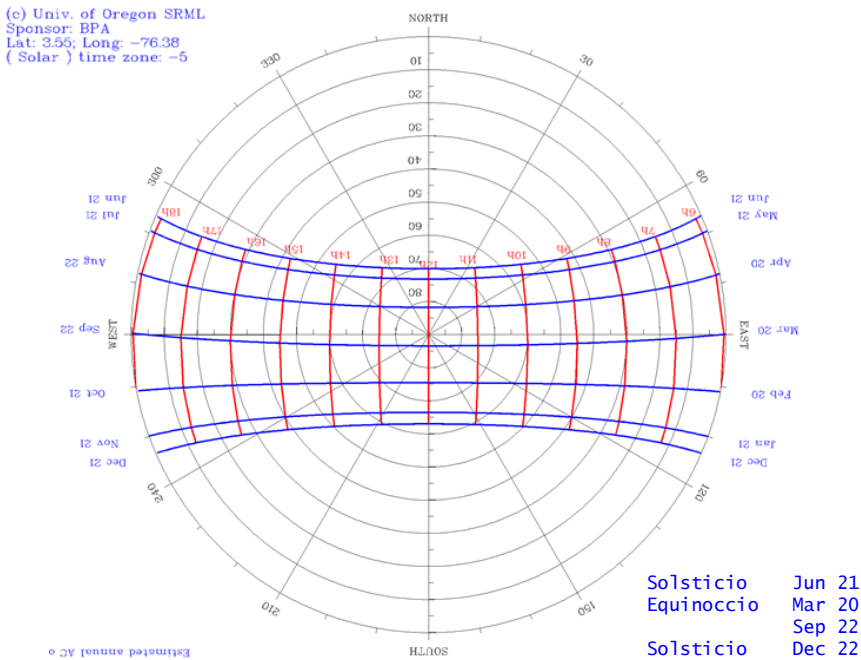
Altura solar β : Comprendido entre el rayo solar y la proyección de este sobre el plano horizontal.

Acimut solar ϕ : Comprendido entre la proyección de los rayos solares sobre la superficie horizontal y el sur. Es **negativo** para horas de la mañana y **positivo** para horas de la tarde [6].

Figura 3-1: Lectura de ángulos solares. a) Carta solar, b) Mapa estereográfico [5]



(b)



Una vez se conozca la altura solar y el acimut solar se determinan los siguientes ángulos [6]:

Acimut de la pared ψ : Comprendido entre la normal a la superficie y el sur. Es **negativo** si la superficie está orientada al este y **positivo** si está orientado al oeste.

Acimut solar de la pared γ : Comprendido entre la proyección sobre el plano horizontal del rayo solar y la normal a la superficie, se determina por la siguiente relación matemática:

$$\gamma = \phi \pm \psi \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Si $90^\circ < \gamma < -90^\circ$, la superficie está en sombra

Incidencia θ : Comprendido entre el rayo solar y la normal a la superficie.

Para una superficie vertical:

Ecuación 3-2

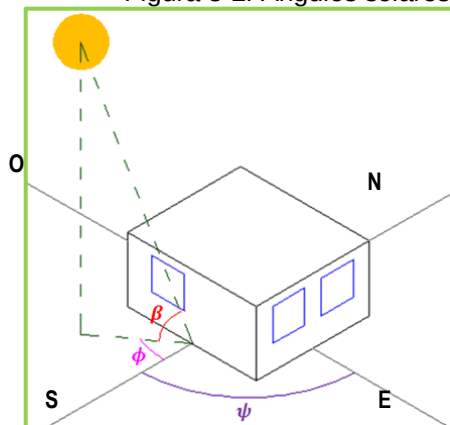
$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos \gamma$$

Para una superficie horizontal:

Ecuación 3-3

$$\cos \theta = \sin \beta$$

Figura 3-2: Ángulos solares



b) Radiación solar incidente en el lugar

La radiación solar que llega a la superficie terrestre se le llama *Radiación Solar Directa* G_{ND} , la cual viene acompañada de la *Radiación Solar Difusa* G_d , y la *Radiación Solar Reflejada* G_R que se refleja desde superficies circundantes.

Toda ellas se obtienen a partir del **Modelo de Cielo Despejado de la ASHRAE** (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers), llamado así porque los cálculos se hacen bajo el supuesto de la inexistencia de nubosidad [6].

RADIACION SOLAR DIRECTA:

$$G_{ND} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\text{Sen}\beta}\right)} \quad \text{Ecuación 3-4}$$

G_{ND} : Radiación normal directa, W/m^2 o $\text{Btu}/(\text{hr-ft}^2)$

A : Radiación solar aparente a través de una masa de aire igual a cero, W/m^2 o $\text{Btu}/(\text{hr-ft}^2)$.

B : Coeficiente de extinción atmosférica

β : Altura solar, medida en grados

RADIACION SOLAR DIFUSA:

$$G_d = C \cdot G_{ND} \quad \text{Ecuación 3-5}$$

G_d : Radiación solar difusa, W/m^2 o $\text{Btu}/(\text{hr-ft}^2)$

C : Relación entre la radiación difusa sobre una superficie horizontal y la radiación solar directa

Los coeficientes A , B y C se obtienen a partir de los datos solares para los días 21 de cada mes (tabla 3-1).

Tabla 3-1: Radiación solar extraterrestre [6]

MES	A W/m ²	B Adimensional	C
Enero	1202.70	0.141	0.103
Febrero	1187.55	0.142	0.104
Marzo	1164.52	0.149	0.109
Abril	1130.45	0.164	0.120
Mayo	1106.47	0.177	0.130
Junio	1092.59	0.185	0.137
Julio	1093.53	0.186	0.138
Agosto	1107.42	0.182	0.134
Septiembre	1136.44	0.165	0.121
Octubre	1166.41	0.152	0.111
Noviembre	1190.39	0.142	0.106
Diciembre	1204.59	0.141	0.103

Una vez halladas la radiación solar directa G_{ND} y difusa G_d se calculan las radiaciones que inciden en el modelo de estudio – medias en W/m² o Btu/(hr-ft²) – [7]

Tabla 3-2: Ecuaciones para el cálculo de los distintos tipos de radiación solar

Radiación solar directa Sobre una superficie horizontal $G_{DH} = G_{ND} \cdot \text{Sen}\beta$	Relación entre la radiación solar incidente sobre una superficie vertical y horizontal (adimensional) $\frac{G_{dV}}{G_{dH}} = 0,55 + 0,437\text{Cos}\theta + 0,313\text{Cos}^2\theta$
Radiación solar directa Sobre una superficie vertical $G_{DV} = G_{ND} \cdot \text{Cos}\theta$	Radiación solar difusa sobre una superficie vertical $G_{dV} = \frac{G_{dV}}{G_{dH}} \cdot G_d$
Radiación solar total Sobre una superficie horizontal $G_{TH} = G_{DH} + G_d$	Radiación solar total sobre una superficie vertical $G_{TV} = G_{DV} + G_{dV} + G_R$
Radiación solar reflejada $G_R = G_{TH} \cdot \rho_g \cdot F_{wg}$ ρ_g: Reflejancia del suelo F_{wg}: Factor angular desde la pared al suelo $F_{wg} = \frac{1-\text{Cos}\Sigma}{2}$; Σ es el ángulo entre la superficie horizontal y la pared	

c) Evaluación de la carga térmica debido al Sol

Luego de hallar los distintos tipos de radiación solar se procede a averiguar la tasa de calor transferida hacia el interior de la envolvente. Para que exista una transferencia de calor, debe haber una diferencia de temperaturas, la cual, para la evaluación de una superficie afectada por el Sol sería, la diferencia entre la temperatura ambiente, la temperatura al interior de la envolvente, y la temperatura exterior, que es la combinación de la radiación solar incidente, la convección con el aire ambiente y el intercambio de radiación con el cielo y las superficies circundantes, a esta temperatura exterior se le llama **Temperatura sol – aire**, $T_{sol-aire}$ [8].

$$T_{sol-aire} = T_{amb} + \frac{\alpha_s}{h_o} \cdot q_{solar} - \frac{\varepsilon \sigma}{h_o} \cdot (T_{amb}^4 - T_{sur}^4) \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Donde:

α_s : Absortividad de la pared

h_o : Convección combinada, en verano el valor es de 17 W/m².°C

$\dot{q}_{solar}$: Radiación solar incidente sobre la superficie, medido en W/m² o Btu/(hr-ft²)

ε : Emisividad de la superficie

σ : Constante de Boltzmann, 5.67x10⁻⁸ W/m².K⁴

T_{surr} : Es el cambio de la temperatura ambiente debido a corrección del efecto de la radiación

El calor transferido a través de una superficie, pared o techo, se expresa como:

$$\dot{Q}_{superficie} = U \cdot A \cdot (T_{sol-aire} - T_{inside}) \quad \text{Ecuación 3-7}$$

U: Coeficiente global de transferencia de calor del material W/m².°C o Btu/(hr-ft²) .°F. Es equivalente al inverso de la resistencia térmica del material **R**

A: Área sobre la cual se transfiere el calor

$T_{sol-aire}$: Temperatura sol-aire

T_{inside} : Temperatura al interior de la fachada

El calor transferido a través de una ventana se expresa como:

$$\dot{Q}_{solar, ganancia} = A_{vidrio} \cdot SHGC \cdot \dot{q}_{solar incidente} \quad \text{Ecuación 3-8}$$

Donde **SHGC** es el **coeficiente de ganancia de calor solar**, es decir la fracción de radiación solar incidente que entra a través del vidrio. El SHGC se obtiene a partir de la relación existente entre la ganancia de calor solar de un vidrio de cualquier tipo y uno de doble resistencia, debido a que el SHGC vidrio de doble resistencia es 0.87 con su respectivo **coeficiente de sombra SC=1**

$$SC = \frac{SHGC \text{ vidrio}}{SHGC \text{ vidrio de doble resisetncia}} = \frac{SHGC \text{ vidrio}}{0.87} \quad \text{Ecuación 3-9}$$

Según el tipo de vidrio el SHGC se obtiene de la tabla 2-5, en la cual se debe multiplicar el coeficiente de sombra SC por 0.87.

Tabla 3-3 Coeficiente de sombra y Transmisión solar para algunos tipos de vidrio [8]

Type of glazing	mm	in	τ_{solar}	SC*
a) Single Glazing				
Clear	3	1/8	0.86	1.0
	6	1/4	0.78	0.95
	10	3/8	0.72	0.92
	13	1/2	0.67	0.88
Heat absorbing	3	1/8	0.64	0.85
	6	1/4	0.46	0.73
	10	3/8	0.33	0.64
	13	1/2	0.24	0.58
b) Double Glazing				
Clear in	3 ^a	1/8	0.71	0.88
Clear out	6	1/4	0.61	0.82
Clear in, heat absorbing out^c	6	1/4	0.36	0.58
*Multiply by 0.87 to obtain SHGC ^a The thickness of each pane of glass ^b Combined transmittance for assembled unit ^c Refers to gray-, bronze, and green-tinted heat-absorbing float glass				

3.1.2 Cargas de calor al interior de la envolvente

Este calor hace referencia al producido por personas, luces o aparatos.

a) Personas

Relacionado al calor generado por los ocupantes, tiene dos componentes: *calor sensible*, el cual es el generado por el calentamiento del aire que rodea la piel y *latente* debido a la evaporación del sudor cuando está en contacto con la temperatura ambiente exterior, ambos tipos de calor varían de acuerdo al nivel de actividad del personal. En el anexo A se visualiza la ganancia de calor de acuerdo al sitio y nivel de actividad [8].

b) Luces y equipos

La cantidad de calor cedido al espacio, debido al nivel de iluminación, se mide en lux, ($\text{lux} = \text{lumen}/\text{m}^2$). La eficiencia de la iluminación versus el calor generado se muestra en el anexo B [8].

Los niveles de lux recomendados para determinados espacio según la actividad que se desarrolla se da en la tabla 3-6

Tabla 3-4: Niveles típicos recomendados de iluminancia [9]

Ubicación – Tipo actividad	Nivel de iluminancia [lux]
Oficinas generales	400
Puestos de trabajo informatizados	500
Áreas de montaje en fábrica	
Trabajo de poca precisión	300
Trabajo medio	500
Trabajo de precisión	750
Trabajo de alta precisión	
Montaje de instrumentos	1000
Montaje/reparaciones de joyería	1500
Quirófanos de hospital	50000

Los equipos que trataremos serán los equipos de oficina, concernientes a este proyecto, tan solo es tener en cuenta el calor que los computadores el cual está en el orden de 300 a 200 Watts.

3.2 ENERGY PLUS

Es un programa desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), sus orígenes están en los programas DOE-2 y BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics). Energy Plus tiene como objetivo simular procesos de transferencia de calor, ventilación natural, sistemas de climatización, iluminación y otros procesos relacionados con el consumo de energía. Sigue el método de *Balance Térmico*, que consiste en la solución simultánea de un conjunto de ecuaciones de balance de energía para el aire de la zona y para las superficies interior y exterior de cada pared, techo y piso. Estas ecuaciones de balance de energía se combinan con las ecuaciones para la transferencia transitoria de calor por conducción a través de las paredes y techos, y con algoritmos o datos para las condiciones climáticas, incluyendo la temperatura de bulbo seco del aire exterior, la temperatura de bulbo húmedo, la radiación solar, etc [7].

3.2.1 Datos de entrada

1. Coordenadas geográficas del sitio de estudio
2. Fichero de clima, el cual contiene datos de: Temperatura de bulbo seco del aire exterior, temperatura de rocío del aire exterior, radiación solar normal directa, radiación solar horizontal difusa, velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, altitud solar y acimut solar. Se debe tener cuidado con el día que se selecciona, debido a que los datos mostrados (excepto los ángulos solares) se ven afectados por el clima real que existió en el día de registro.

3. Ocupación:

- *Densidad*: Cantidad de personas por m^2
 - *Tasa metabólica*: Nivel de actividad que se realiza en la zona, por ende la cantidad de calor que habría, ver tabla 2-6.
 - *Perfil laborable*: días y horas de trabajo.
4. Otras ganancias: Cantidad de calor por m^2 proveniente de computadores y cualquier otro equipo que genere calor
5. Iluminación del lugar: cantidad de lux en la zona
6. Cerramientos: Materiales utilizados en la en envolvente de la edificación, se debe tener presente la resistencia térmica del material.
7. Aberturas: Tipo de vidrio, con su respectivo SHGC, se debe tener en cuenta si la ventana utiliza algún dispositivo de sombra como voladizos o quiebravistas, puertas y techos de vidrio
8. Iluminación: Cantidad de Watt/ m^2 cada 100 lux.
9. HVAC: equipo utilizado para mantener el confort térmico, puede ser calefacción, ventiladores, aire acondicionado o ventilación natural.

En el presente proyecto solo nos interesa la ventilación natural, ya que se desea criticar que tan amigable es la envolvente del edificio respecto a posibles ahorros de energía como resultado del no uso de equipos de aire acondicionado.

3.2.2 Datos de salida.

En el presente trabajo es de interés:

- Temperatura del aire interior.
- Temperatura radiante.
- Humedad relativa.
- Índice de Fanger, PMV
- Ganancia solar en la envolvente: Techo, paredes y ventanas.
- Iluminación natural.

4. EDIFICIO OBJETO DE ESTUDIO

El edificio objeto de estudio es el de Administración Central (301), de la Universidad del Valle, ubicado en el campus de Meléndez. Por ser un edificio de la Universidad, fue fácil tener acceso a la información necesaria para el desarrollo de este trabajo, como son fotografías, mediciones y planos.

Figura 4-1: Edificio de Administración Central



4.1 DESCRIPCIÓN

El edificio es de forma rectangular, abarca un área de aproximadamente 80,5 x 29 m, y altura de 17 m, con 4 pisos (figura 4-2, figura 4-3, figura 4-4, figura 4-5), 23 oficinas y su eje longitudinal está orientado a 0° en relación al Norte.

La mayor parte de la ventanería del edificio está ubicada en las fachadas Norte y Sur (figuras 4-8, 4-9), por ello no hay oportunidad de que los rayos del sol incidan directamente en horas de la tarde y la mañana. En las fachadas Este y Oeste el área de la ventanería es pequeña en relación al área de la pared (figuras 4-6, 4-7).

Figura 4-2: Vista en Planta del primer piso

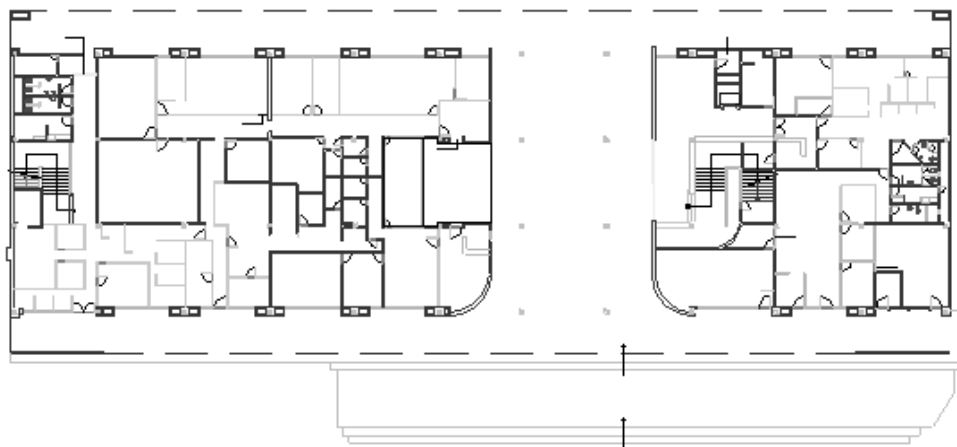


Figura 4-3: Vista en planta del segundo piso

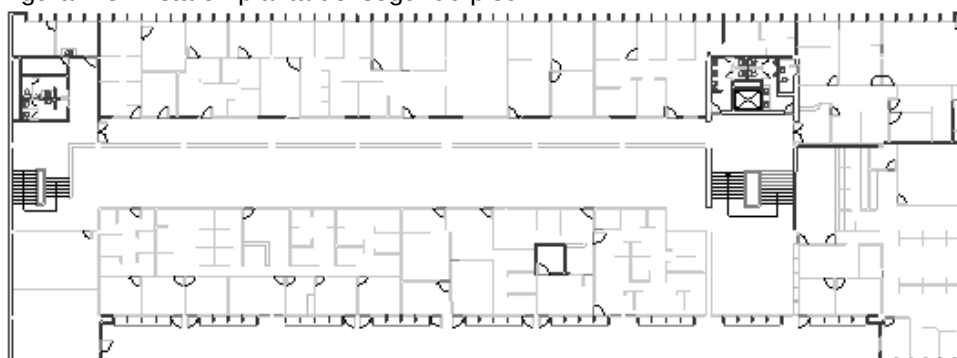


Figura 4-4: Vista en planta del tercer piso

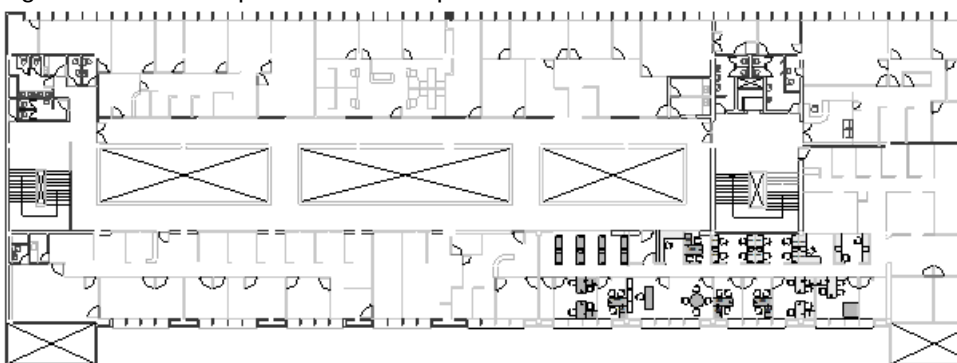


Figura 4-5: Vista en planta del cuarto piso

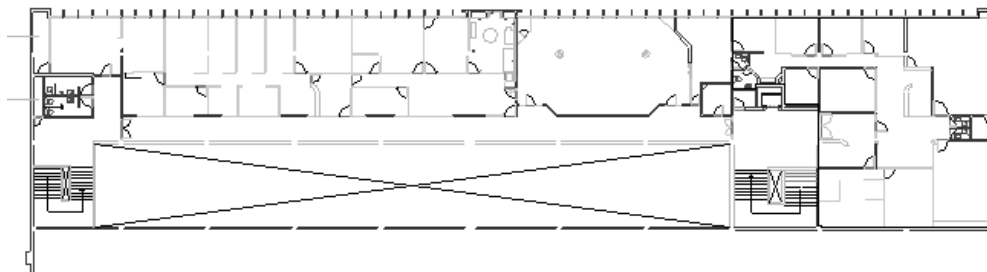


Figura 4-6: Vista lateral izquierda del Edificio 301

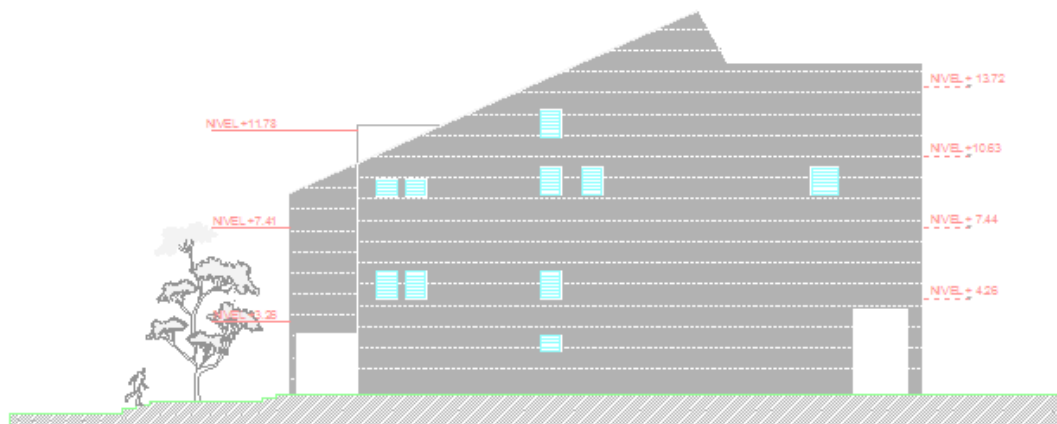


Figura 4-7: Vista lateral derecha del Edificio 301

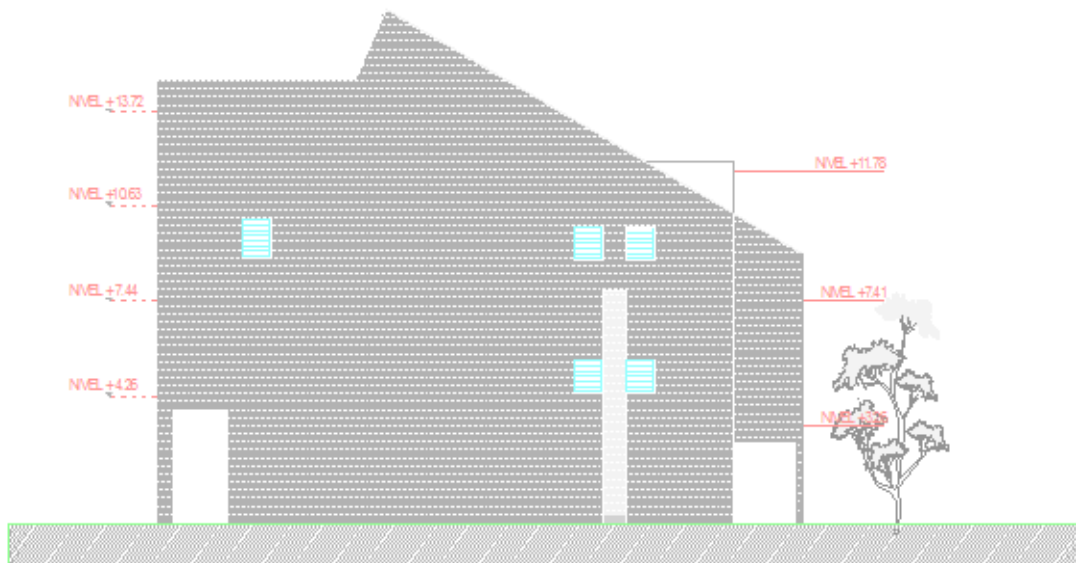


Figura 4-8: Vista sur del Edificio 301

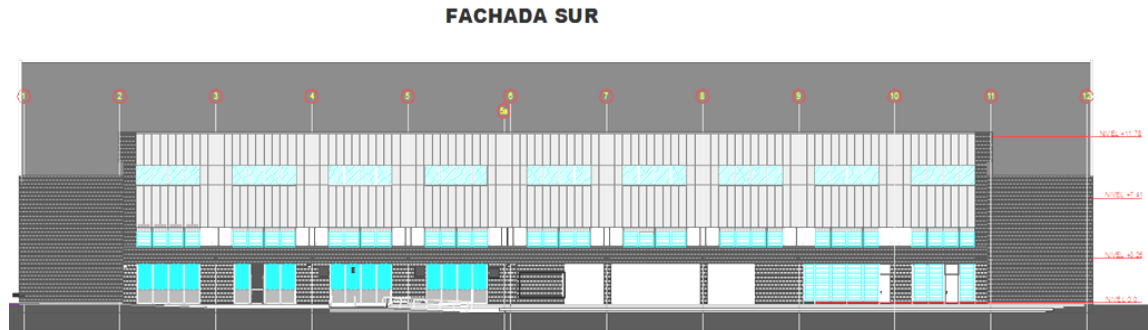
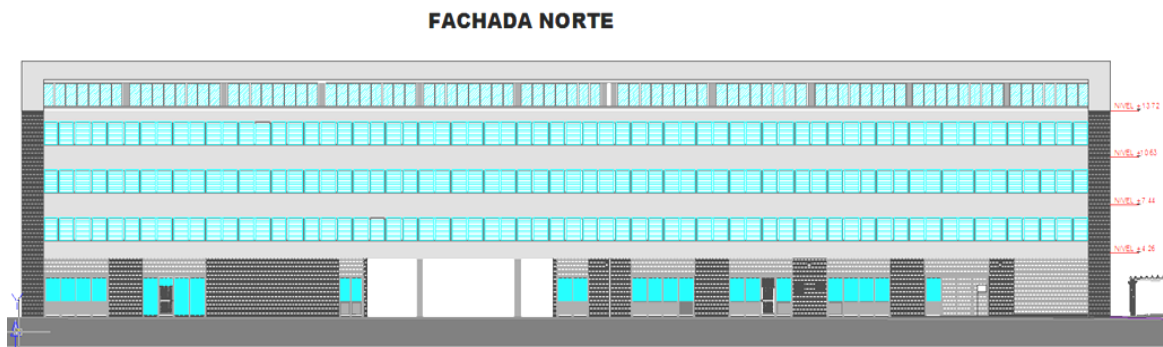


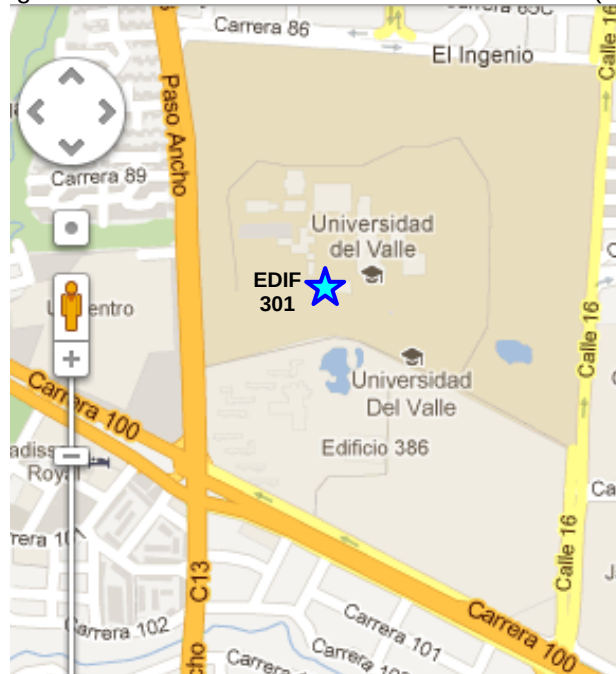
Figura 4-9: Vista norte del edificio 301



4.2 UBICACIÓN Y REGION CLIMATICA

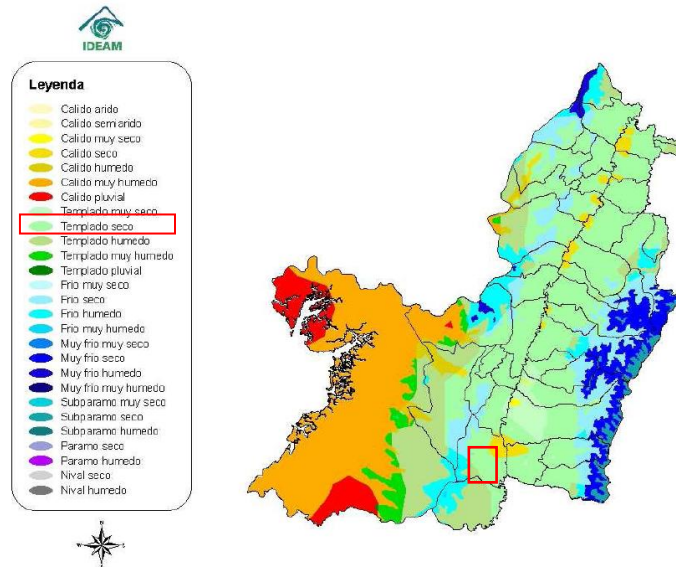
El edificio 301 se encuentra ubicado a 3° 22' latitud Norte y 76°32' longitud Oeste, en la ciudad universitaria Meléndez de la Universidad del Valle, en el sur de la ciudad de Cali (figura 3-10). El edificio está entre el edificio de Ciencias Naturales y Exactas (320) y el camino que conduce hacia la biblioteca Mario Carvajal.

Figura 4-10: Ubicación de la Universidad del Valle (10)



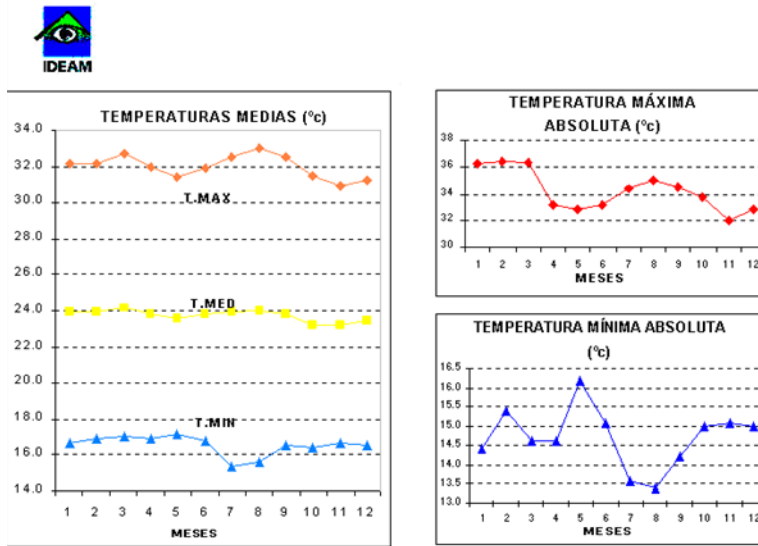
Temperatura: De acuerdo con el IDEAM, Cali posee Clima *Templado Seco* (figura 4-11), temperaturas máximas: absoluta¹ de 36°C y promedio de 32°C, temperaturas mínimas¹: absoluta de 13,5°C y promedio de 16,5°C (figura 3-12).

Figura 4-11: Clima de la ciudad de Cali [11]



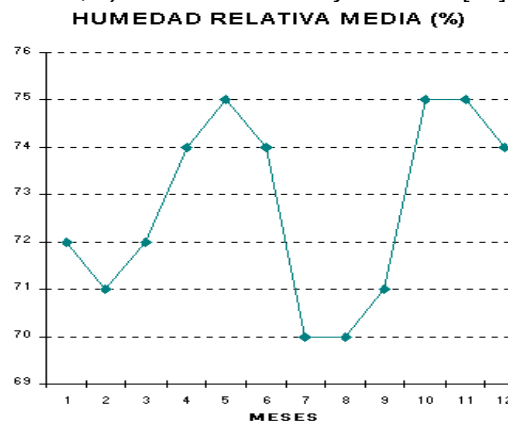
¹ Temperatura máxima/mínima absoluta hace referencia a la temperatura máxima/minima registrada en un lugar durante mucho tiempo [19]

Figura 4-12: Temperatura de la ciudad de Cali [11]

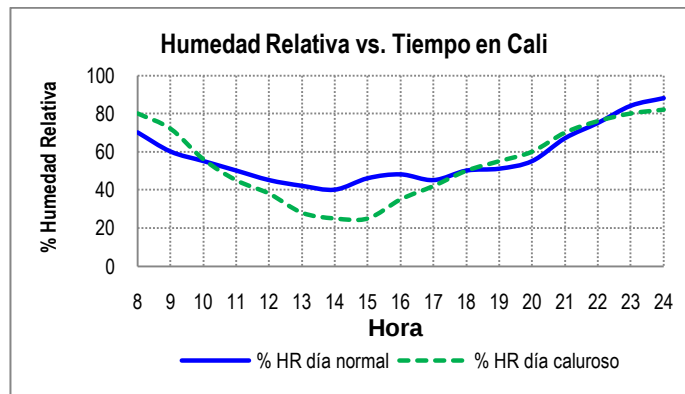


Humedad Relativa: La humedad relativa está en un rango entre 70 -75 % (figura 3-13), pero a lo largo del día, en horas de la tarde, varía entre 40-50% (figura 3-14). [11]

Figura 4-13: Humedad relativa media en Cali, a) promedio durante el año; b) en un día normal y caluroso [11]



(a)



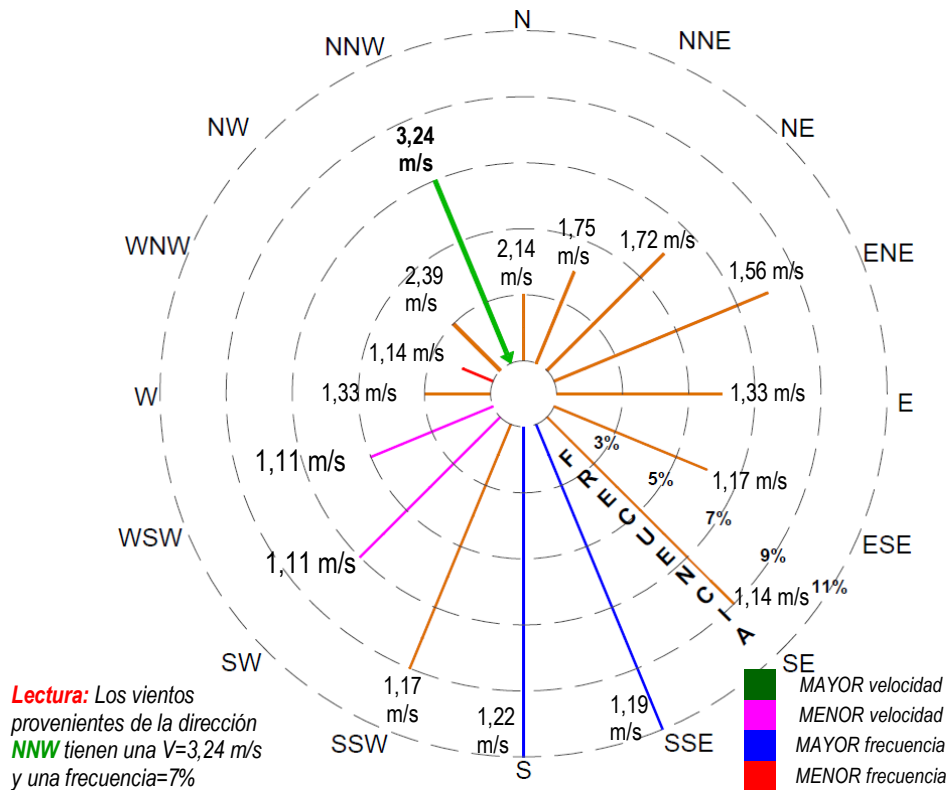
(b)

Vientos: De acuerdo al mapa meteorológico de CENICAÑA, de la estación MELENDEZ (figura 3-16), los vientos para este punto de la ciudad, son los mostrados en la tabla 3-1[12], de aquí se infiere que la dirección en la cual es más frecuente la ventilación es Sur-sureste con un 11% y velocidad de 4,3 km/h $\approx$ 1,19 m/s, sin embargo la mayor velocidad se percibe del Norte-noroeste 11,7 km/h $\approx$ 3,24 m/s, aunque con una frecuencia de 7%.

Tabla 4-1: Vientos de la Estación Meléndez [12]

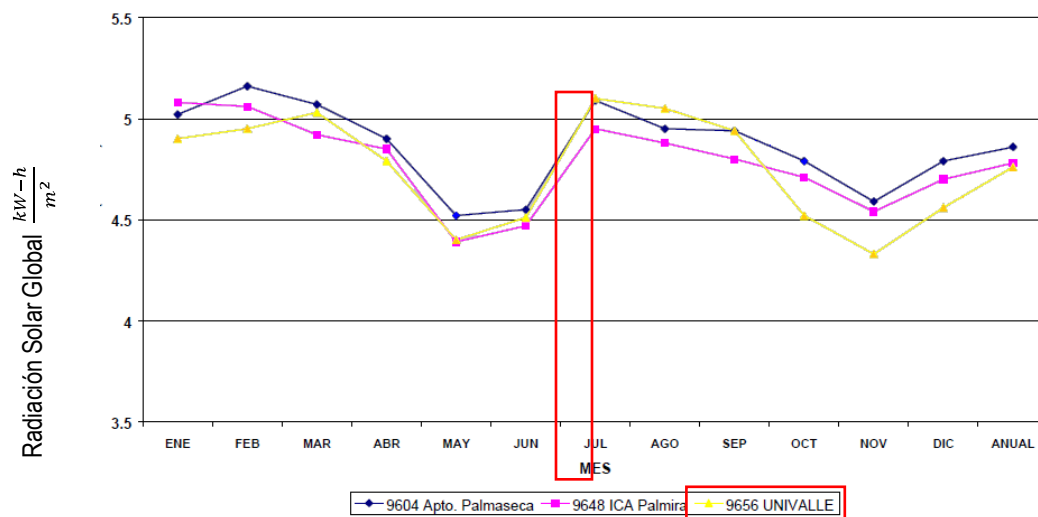
				ESTACION MELENDEZ		LATITUD :		03° 22' 09" N		
						LONGITUD :		76° 31' 12" W		
						ALTITUD :		960 m s n m		
VELOCIDAD MEDIA, VIENTO MAXIMO Y VARIABILIDAD POR DIRECCIONES										
DIRECCION (Procedencia)	FREC. (%)	VELOCIDAD MEDIA (KPH)			VIENTO MAXIMO (KPH)			VARIABILIDAD (GRADOS)		
		MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX
N	3	0,1	7,7	26,1	2,3	15,8	39,9	0	27	83
NNE	4	0,0	6,3	19,2	2,3	13,9	48,0	0	30	77
NE	6	0,0	6,2	22,9	0,1	13,6	41,7	0	32	86
ENE	8	0,0	5,6	19,4	0,0	12,6	38,3	0	34	85
E	6	0,0	4,8	18,9	0,7	11,3	42,8	0	36	78
ESE	6	0,0	4,2	17,0	1,4	10,0	48,1	0	34	81
SE	9	0,0	4,1	15,3	0,0	9,5	27,9	0	30	75
SSE	11	0,0	4,3	20,8	0,0	9,6	51,8	0	27	88
S	11	0,0	4,4	21,8	1,2	9,5	51,2	0	24	82
SSW	9	0,0	4,2	21,6	0,0	9,1	40,5	0	23	71
SW	7	0,1	4,0	18,9	1,3	8,5	45,3	0	23	77
WSW	5	0,1	4,0	19,8	1,6	8,2	57,3	0	21	73
W	3	0,1	4,1	21,3	1,5	9,0	39,9	0	23	66
WNW	2	0,1	4,8	16,7	1,8	10,9	34,8	0	26	76
NW	3	0,0	8,6	23,9	0,0	16,6	42,2	0	20	69
NNW	7	0,3	11,7	25,2	2,4	20,5	54,8	0	17	74

Figura 4-14: Rosa de los vientos de la Estación Meléndez de CENICAÑA



Radiación solar: La radiación solar en la ciudad de Cali varía entre 4.3 kW-h/m², en noviembre, hasta 5.1 kW h/m², en julio, siendo este mes uno de los más calurosos, figura 4-15.

4-15: Radiación Solar Global. [13]



5. MEDICIONES E INDICE DE FANGER

Se recopilan las variables que inciden en el Índice de Fanger: *temperatura media radiante, humedad relativa, temperatura de bulbo seco, velocidad del aire, clo, met*; de las oficinas del edificio de Administración Central (301), que no poseen aire acondicionado, en este caso sería las oficinas *Editorial y Gestión documental*.

La toma de datos se realiza aproximadamente durante 7 días, en horario de la tarde que es cuando se presentan las temperaturas mas altas.

5.1 HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA DE BULBO SECO

Para la medición de la humedad relativa se utiliza se utiliza un registrador, marca EXTECH Instruments, modelo RHT10, ubicándose uno en cada oficina. El periodo de mediciones inicia, para la oficina *Editorial* en enero 10 y finaliza el 24 del mismo mes, para la oficina de *Gestión documental* inicia en enero 11 y finaliza el 24 del mismo mes, se registra datos cada 5 minutos.

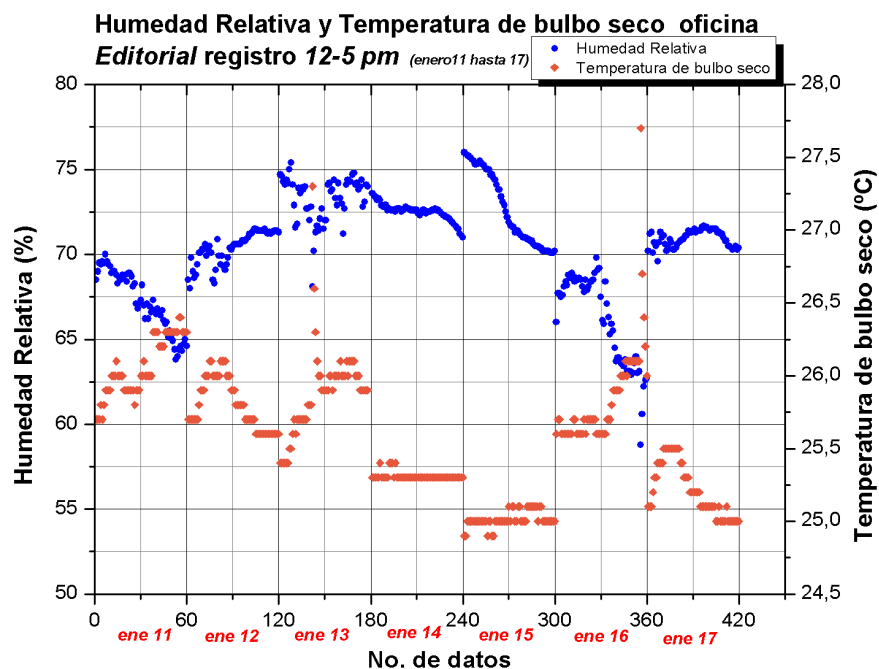
Figura 5-1: Sensor de humedad relativa y temperatura de bulbo seco Marca EXTECH - modelo RHT10 [14]



5.1.1 Mediciones en la Oficina Editorial

Se registra datos a partir del día 11 hasta el 17 de enero, cada 5 minutos. Para el estudio no se tienen en cuenta los días en los que hayan existido lluvias y los registros son de 12pm a 5 pm, por ello para cada día se tiene 60 tomas, para un total de 420 datos (grafica 4-1).

Figura 5-2: % Humedad relativa y Temperatura de bulbo seco. Oficina Editorial



El valor promedio de la humedad relativa es de $\bar{x} = 70,43$ % con una desviación estándar $\sigma = 3,03$ y coeficiente de variación $C_v = 4,3\%$

El valor promedio de la temperatura de bulbo seco es de $\bar{x} = 25,58^\circ\text{C}$ con una desviación estándar $\sigma = 0,43$ y coeficiente de variación $C_v = 1,67\%$

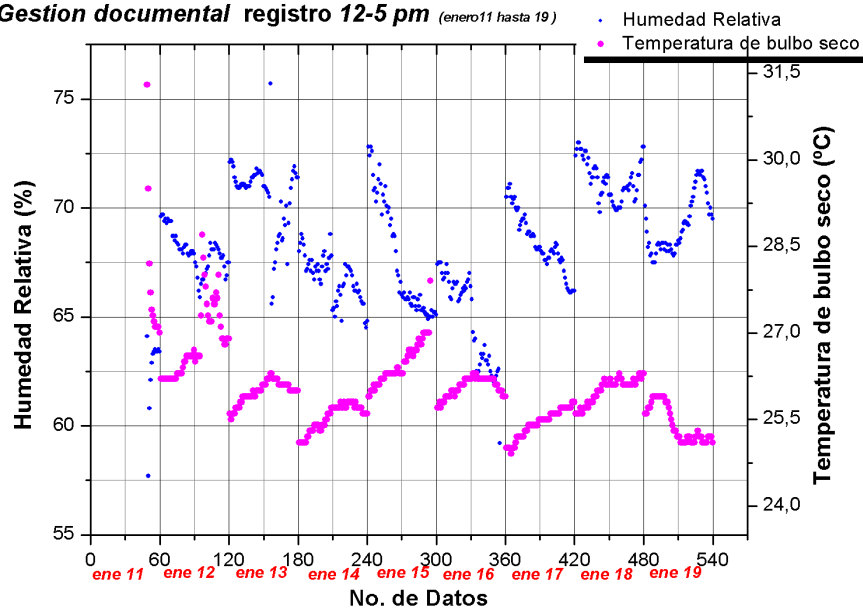
5.1.2 Mediciones en la Oficina de Gestión Documental

Se registra datos a partir del día 11 hasta el 19 de enero, cada 5 minutos. Para el estudio se tiene en cuenta que no hayan lluvias y los registros son de 12 pm a 5 pm, por ello para cada día se tienen 60 tomas, para un total de 480 datos.

Figura 5-3: % Humedad relativa y Temperatura de bulbo seco. Oficina Gestión Documental

Humedad Relativa y Temperatura de bulbo seco oficina

Gestión documental registro 12-5 pm (enero11 hasta 19)



El valor promedio de la humedad relativa es de $\bar{x} = 68,28$ % con una desviación estándar $\sigma = 2,75$ y coeficiente de variación $C_v = 4,06\%$

El valor promedio de la temperatura de bulbo seco es de $\bar{x} = 26,09$ °C con una desviación estándar $\sigma = 0,65$ y coeficiente de variación $C_v = 2,51\%$

5.2 VELOCIDAD DEL AIRE

Para las mediciones de la velocidad del aire se utiliza un velometro, marca TSI, modelo 5725. El periodo de mediciones inicia para la oficina *Editorial* en enero 11, y en la oficina de *Gestión documental* en enero 13, registrando datos en 1 hora, cada 10 segundos. Estos datos se toman en la jornada de la tarde (1:30 - 4:30 pm) y se repite esta tarea hasta el día 24 de enero, excepto en los fines de semana

Se registra datos los días 11, 13, 16, 19 y 23 de enero, cada 10 segundos. Para el estudio se tiene en cuenta que no hayan lluvias y los registros tienen una duración de 1 hora, por ello para cada día se tienen 360 tomas, para un total de 1800 datos.

Velocidad del aire en oficina editorial

♦ Velocidad del aire

enero 11, 13, 16, 19, y 23 de 2012

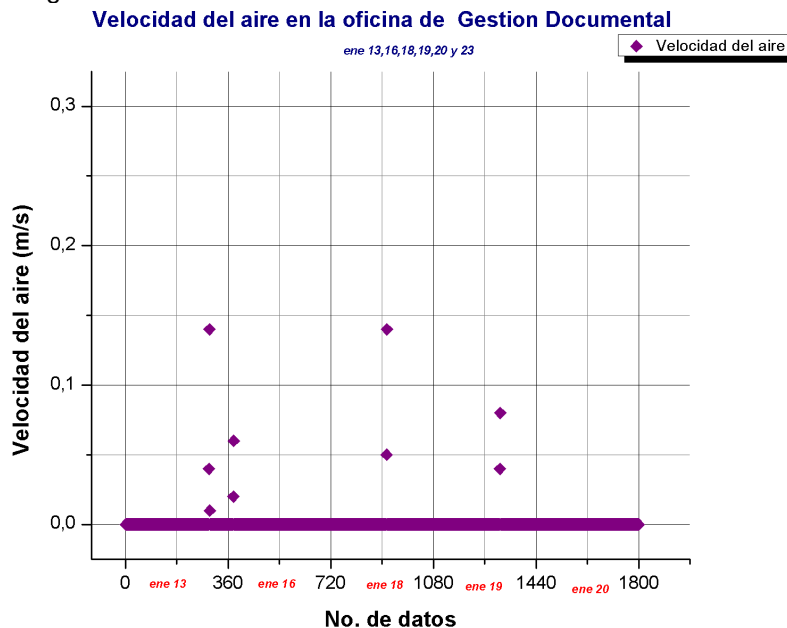
No. de datos	Velocidad del aire (m/s)	Fecha
0	0.00	ene 11
360	0.02	ene 11
360	0.11	ene 11
360	0.16	ene 11
360	0.18	ene 11
360	0.02	ene 13
360	0.02	ene 13
360	0.02	ene 13
360	0.02	ene 13
360	0.10	ene 13
360	0.12	ene 13
360	0.18	ene 13
1800	0.01	ene 23
1800	0.13	ene 23

El valor promedio de la velocidad del aire es de $\bar{x}=0,001$ m/s con una desviación estándar $\sigma = 0,000$ y coeficiente de variación $C_v = 0$

5.2.2 Mediciones en la Oficina de Gestión Documental

Se registra datos los días 13, 16, 18, 19, 20 y 23 de enero, cada 10 segundos. Para el estudio se tiene en cuenta que no hayan lluvias y los registros tienen una duración de 1 hora, por ello para cada día se tienen 360 tomas, para un total de 1800 datos.

Figura 5-6: Velocidad del viento. Oficina de Gestión Documental



El valor promedio de la velocidad del aire es de $\bar{x}=0,000$ m/s con una desviación estándar $\sigma = 0,000$ y coeficiente de variación $C_v = 0$, ya que no se tienen en cuenta los datos alejados al promedio, y son muy pocos en comparación a la cantidad de datos tomados.

5.3 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE

Para termografía se utiliza una cámara infrarroja, marca FLIR, este es un equipo que mide la emisión natural de radiación infrarroja procedente de un objeto y genera una imagen

térmica, para ello se tiene en cuenta la emisividad del material a medir, los cuales son: vidrio, panel yeso y baldosa.

Se realizaron 5 tomas, en las 6 caras de la oficina durante los días 13, 16, 18, 19 y 23 de enero los cuales eran los días más soleados y con ausencia de lluvias en la oficina Editorial, tabla 5-1 y la oficina de Gestión Documental, tabla 5-2.

Tabla 5-1: Temperatura superficial de las paredes Oficina Editorial.

	Ene-13	Ene-16	Ene-18	Ene-19	Ene-23	$\bar{x}$	σ	C_v (%)
Lado O	27,90	27,20	25,40	25,90	26,30	26,54	0,90	3,39
Lado E	27,70	27,60	26,60	26,70	25,50	26,82	0,80	2,98
Lado N	28,40	28,40	27,70	27,20	25,90	27,52	0,93	3,37
Lado S	28,20	27,50	27,00	27,70	25,70	27,22	0,85	3,13
Techo	27,70	26,60	26,60	26,60	24,10	26,32	1,19	4,52
Piso	26,70	25,90	25,90	25,50	23,30	25,48	1,16	4,54

Tabla 5-2: Temperatura superficial de las paredes Oficina Gestión Documental.

	Ene-16	Ene-18	Ene-19	Ene-20	Ene-23	$\bar{x}$	σ	C_v (%)
Lado O	26,80	27,10	27,10	26,30	26,10	26,68	0,41	1,54
Lado E	28,00	27,20	26,70	26,60	26,80	27,06	0,51	1,89
Lado N	26,90	26,00	27,00	26,50	25,80	26,44	0,48	1,80
Lado S	29,20	27,10	27,60	26,80	26,80	27,50	0,90	3,27
Techo	27,60	25,70	27,30	26,30	25,80	26,54	0,78	2,92
Piso	26,90	25,90	26,60	25,00	25,60	26,00	0,68	2,63

5.4 INDICE DE FANGER

Con los datos registrados de la velocidad del aire, temperatura media radiante, temperatura de bulbo seco y % de humedad relativa, además de las áreas de las oficinas, se calcula el índice de Fanger, de esta manera se conoce el nivel de confortabilidad de los espacios. El cálculo se realiza a través de la herramienta de la cual se hizo referencia en el capítulo 2 (página 10) desarrollada por la Universidad de Gävle (4), en la tabla 5-3 y 5-4 se observa los resultados del cálculo del índice de Fanger para la oficina de Gestión Documental y Editorial respectivamente.

Tabla 5-3: Cálculo Índice de Fanger. Oficina Gestión Documental

PARAMETER	INPUT
Clothing (clo)	1,00
Air temp. (°C)	26,1
Mean radiant temp. (°C)	26,5
Activity (met)	1,0
Air speed (m/s)	0,00
Relative humidity (%)	68,3

Calculate PMV

Parameter	Results
Operative temp. (°C)	26,3
PMV	1,1
PPD	30,5

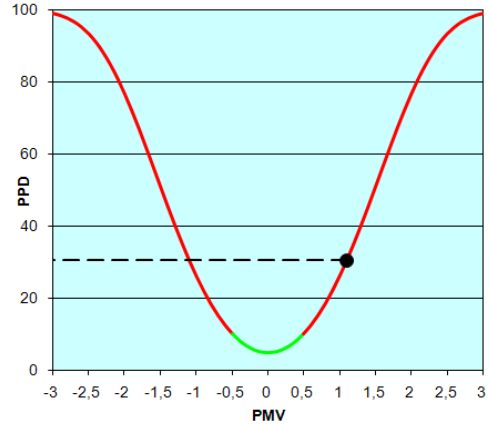
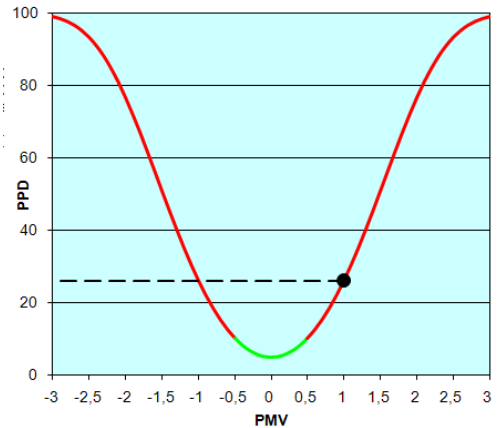


Tabla 5-4: Calculo Índice de Fanger. Oficina Editorial

PARAMETER	INPUT
Clothing (clo)	1,00
Air temp. (°C)	25,6
Mean radiant temp. (°C)	26,7
Activity (met)	1,0
Air speed (m/s)	0,00
Relative humidity (%)	70,4

Calculate PMV

Parameter	Results
Operative temp. (°C)	26,15
PMV	1
PPD	26,1



Análisis: Para la época en la que se tomaron los datos el índice de Fanger da como resultado que el PMV está entre 1 y 2 (1,5) lo cual significa que la sensación térmica está entre Caluroso y ligeramente caluroso. La inconfortabilidad en el lugar se da como consecuencia de la ausencia de ventilación ya que la temperatura media radiante registrada no es lo suficientemente alta como para ser la responsable, además como se observó en el análisis de resultados de la temperatura media radiante, ningún lugar de la oficina es una fuente de calor importante. El hecho de que no haya una corriente de aire significa que el calor generado en el lugar, por los ocupantes, lámparas y principalmente por los computadores, hace que este calor no sea removido, de esta forma se aumenta las temperaturas respectivas y se presentaría una posible baja del % de humedad relativa. Este análisis es el mismo para ambas gráficas.

6. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Se realiza en base a un modelo más sencillo (figura 6-1) que el tratado en este proyecto, cuyo fin es demostrar la veracidad del programa a través de la comparación de los resultados obtenidos tanto de la simulación como de las ecuaciones expuestas en la sección 3.1.1 (página 16)

Los cálculos que se describen a continuación se realizan bajo condiciones estacionarias², es decir, se realiza el cálculo para determinada hora, 12:00 p.m. y 3:00 p.m. y las ecuaciones utilizadas no muestran una transición entre una hora y otra.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo está ubicado bajo las mismas coordenadas geográficas que el Edificio 301 así como el día y las horas.

Para el desarrollo de las ecuaciones, con las que se pretende comparar la simulación, se introducen los datos de *temperatura de bulbo seco*, *radiación solar normal directa*, *radiación solar horizontal difusa*, *velocidad y dirección del viento*, *altitud y acimut solar*, del fichero de datos de Energy Plus (tabla 6-1).

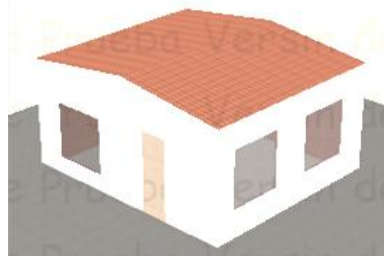
Tabla 6-1: Datos de clima y geometría solar para las 12:00 p.m. y las 3:00 p.m.

MAYO 31 DE 2002		HORA	
		12:00 PM	3:00 PM
RADIACION SOLAR NORMAL DIRECTA	kW	1,003	0,991
RADIACION SOLAR HORIZ DIFUSA	kW	0,121	0,092
ALTITUD SOLAR β	°	88,72	46,29
ACIMUT SOLAR ϕ	°	67,58	272,13
TEMP BULBO SECO EXT	°C	30,4	32,8
VELOCIDAD DEL VIENTO	m/s	0,9	2
DIRECCION DEL VIENTO	°	156	110

² Estacionario quiere decir que no cambia con el tiempo.

Modelo computacional, generado por DesignBuilder, para la validación:

Figura 6-1: Modelo Computacional



Los materiales de los que está compuesto el modelo, con sus respectivas propiedades térmicas, tomados de la librería de DesignBuilder, son:

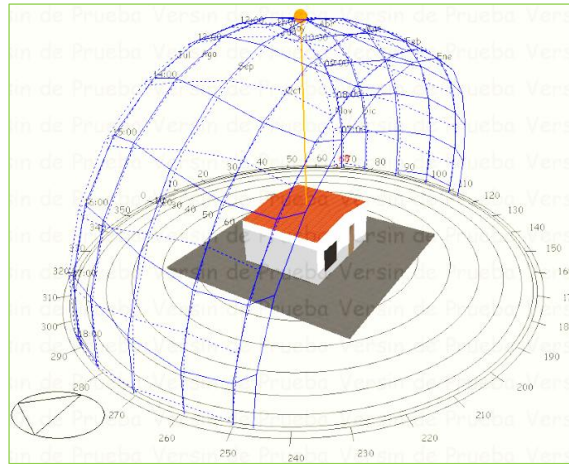
Tabla 6-2: Propiedades térmicas de los materiales del modelo

COMPONENTES MODELO	MATERIAL	ESPESOR m	CONDUCTIVIDAD W/m-K	EMISIVIDAD ϵ
Fachada Exterior	Estuco	0,005	0,18	0,9
	Ladrillo	0,110	0,72	0,9
Antejardín	Asfalto	0,025	0,55	0,9
Techo	Teja de barro	0,025	0,55	0,9

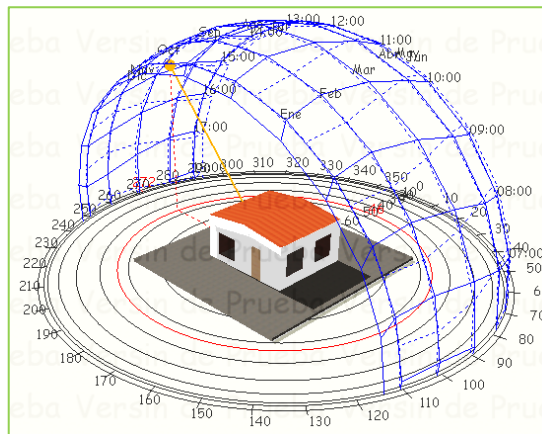
6.2 ÁNGULOS SOLARES

En las siguientes imágenes se puede apreciar la ubicación del modelo de validación respecto al Sol (figuras 6-2). Se visualiza la altura solar β y el acimut solar ϕ , para cada hora, 12:00 p.m. y 3:00 p.m.

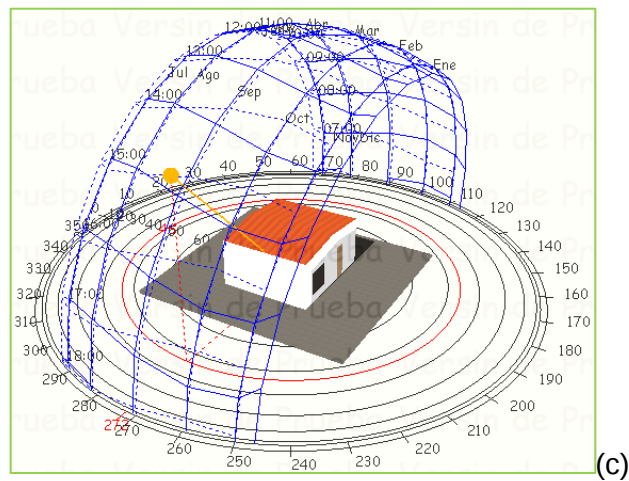
Figura 6-2: Orientación del Sol respecto al modelo computacional. a) Hora 12:00 p.m, b) Hora: 3:00 p.m. pared oeste, c) Hora: 3:00 p.m. pared este



(a)



(b)



(c)

Los ángulos solares sobre los cuales se trabajara en esta sección están determinados por la fecha y la hora, de acuerdo a las ecuaciones (1 y 2) y los datos de la tabla (6-1):

$$\gamma = \phi - \psi \quad \text{Ecuación 6-1}$$

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos \gamma \quad \text{Ecuación 6-2}$$

Tabla 6-3: Resultados de las ecuaciones 6-1 y 6-2

ORIENTACION	ACIMUT PARED ψ	Ecuación 6-1 ACIMUT SOLAR SUPERFICIE Y		Ecuación 6-2 $\cos \theta$ $\neq$ Incidencia	
		12:00	3:00	12:00	3:00
ESTE	-90	157,58	362,13	-0,021	0,022
OESTE	90	-22,42	182,13	0,021	-0,022
NORTE	180	-112,42	92,13	-0,009	-0,001
SUR	0	67,58	272,13	0,009	0,001

6.3 ANALISIS DE GANANCIA SOLAR

Este análisis se debe realizar teniendo en cuenta la orientación del modelo ya que dependiendo de esta, la carga solar se afecta, obviamente sin olvidar la hora. Antes de calcular las ganancias solares, se debe determinar los diferentes tipos de radiación solar que afectan el entorno teniendo en cuenta lo siguiente:

- *Inclinación de la superficie* $\sum 90^\circ$
- *Factor angular desde la pared al suelo* $F_{wg} 0,50$
- *Reflejancia del suelo* $\rho_g 0,25$

Ecuaciones que describen los tipos de radiación que afectan este caso:

$$\dot{q}_{solar\ Directa\ h} = \dot{q}_{solar} \cdot \sin \beta \quad \text{Ecuación 6-3}$$

$$\dot{q}_{solar\ Total\ H} = \dot{q}_{solar\ Directa\ H} + \dot{q}_{solar\ difusa\ H} \quad \text{Ecuación 6-4}$$

$$\dot{q}_{solar\ Reflejada} = \dot{q}_{solar\ Total\ H} \cdot \rho_g \cdot F_{wg} \quad \text{Ecuación 6-5}$$

Tabla 6-4: Resultados de las ecuaciones 6-3, 6-4 y 6-5

			12:00	3:00
Ecuación 6-3	Radiación solar DIRECTA sobre SUELO	kW	1,003	0,716
Ecuación 6-4	Radiación solar TOTAL SOBRE SUELO	kW	1,124	0,808
Ecuación 6-5	Radiación solar REFLEJADA desde SUELO	kW	0,140	0,101

Los diferentes tipos de radiación solar que afectan el modelo

$$\frac{\dot{q}_{dv}}{\dot{q}_{dH}} = 0,55 + 0,437\cos\theta + 0,313\cos^2\theta \quad \text{Ecuación 6-6}$$

$$\dot{q}_{dv} = \dot{q}_{dH} \cdot \frac{\dot{q}_{dv}}{\dot{q}_{dH}} \quad \text{Ecuación 6-7}$$

$$\dot{q}_{solar\ difusa\ Total} = \dot{q}_{dv} + \dot{q}_{solar\ Reflejada} \quad \text{Ecuación 6-8}$$

Tabla 6-5: Resultados de las ecuaciones 6-6, 6-7 y 6-8

ORIENTACION	Ecuación 6-6		Ecuación 6-7		Ecuación 6-8	
	Relación entre la Radiación DIFUSA VERTICAL y HORIZONTAL		Radiación DIFUSA VERTICAL kW		Radiación DIFUSA TOTAL kW	
	12:00	3:00	12:00	3:00	12:00	3:00
ESTE	0,541	0,560	0,065	0,052	0,206	0,153
OESTE	0,559	0,540	0,068	0,050	0,208	0,151
NORTE	0,546	0,550	0,066	0,051	0,207	0,152
SUR	0,554	0,550	0,067	0,051	0,207	0,152

6.4 ANÁLISIS DE GANANCIA SOLAR SOBRE LAS VENTANAS

Teniendo en cuenta el resultado obtenido de la ecuación (6-8) se calcula la ganancia solar a través de las ventanas. Para este caso el vidrio de la ventana es sencillo, de espesor= **3 mm** y Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC) = **0,861**.

Debido a que el Sol no da de manera directa a las ventanas en las horas indicadas, solo se tienen en cuenta la radiación solar difusa. A continuación, la ecuación que describe la ganancia solar en las ventanas es:

$$\dot{Q}_{solar, ganancia} = A \cdot SHGC \cdot \dot{q}_{solar\ difusa\ Total} \cdot No. ventanas \quad \text{Ecuación 6-9}$$

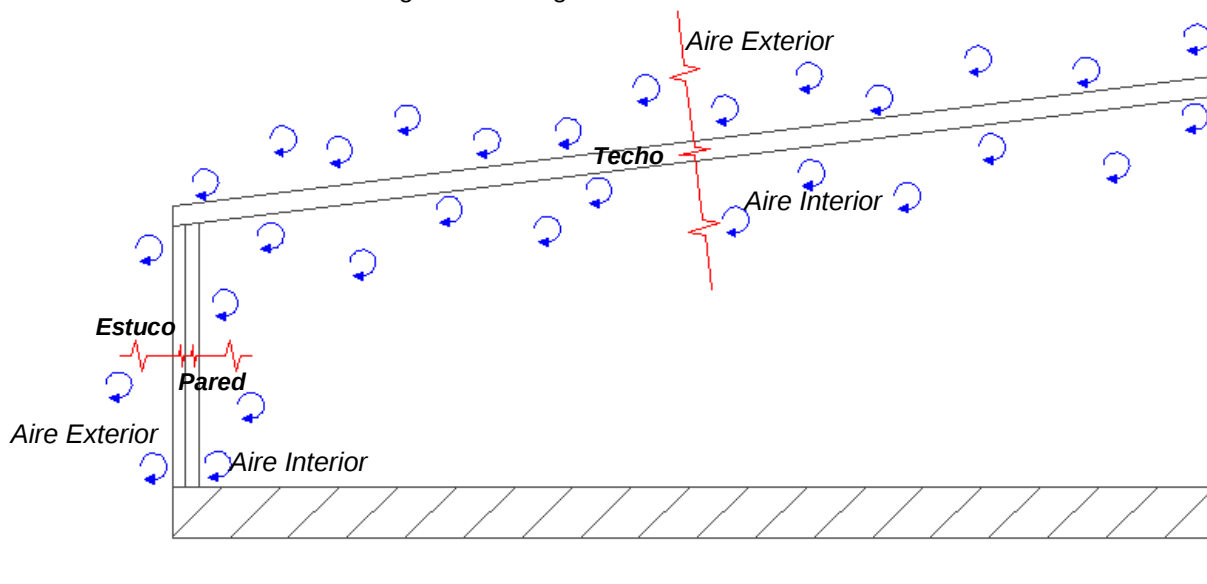
Tabla 6-6: Resultados de la ecuación 6-9

		Ecuación 6-9			
Área VENTANAS m2	Número VENTANAS	Ganancia Solar transmitida a la VENTANA kW		Ganancia Solar TOTAL transmitida a la VENTANA kW	
		12:00	3:00	12:00	3:00
4	2	1,43	1,04	2,13	1,57
0	0	0	0		
0	0	0	0		
4	1	0,71	0,52		

6.5 ANALISIS DE GANANCIA SOLAR SOBRE LA ENVOLVENTE

La envolvente de este modelo está compuesta por: Las ventanas (que se analizaron en el anterior numeral), techo y paredes ([figura 6-3](#)).

Figura 6-3: Diagrama de Resistencias en el modelo



Los materiales que componen el sistema constructivo del modelo, con sus respectivas resistencias térmicas, se enumeran en la tabla 6-7:

Tabla 6-7: Resistencia térmica del sistema constructivo del modelo (8).

	Componentes	R [m ² * °C/W]	R total [m ² * °C/W]
TECHO	Aire Exterior	0,040	0,217
	Asbesto	0,077	
	Aire Interior	0,100	
PARED	Aire Exterior	0,040	0,297
	Estuco	0,037	
	Ladrillo	0,120	
	Aire Interior	0,100	

Las ecuaciones que intervienen en el cálculo de la carga térmica de las paredes y techos, son:

$$T_{sol-aire} = T_{amb} + \frac{\alpha_s}{h_o} \cdot q_{solar} - \frac{\varepsilon\sigma}{h_o} \cdot (T_{amb}^4 - T_{surr}^4) \quad \text{Ecuación 6-10}$$

Tabla 6-8: Resultados de la ecuación 6-10

	TECHO		PARED							
	12:00	3:00	NORTE		SUR		ESTE		OESTE	
	12:00	3:00	12:00	3:00	12:00	3:00	12:00	3:00	12:00	3:00
T_{amb} [°C]	30,4	32,8	30,4	32,8	30,4	32,8	30,4	32,8	30,4	32,8
α_s	0,85	0,85	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
h_o [W/m ² -°C]	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
$\dot{q}_{solar}$ [W]	1003	716	207	152	207	152	206	132	208	836
ε	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
σ	5,67E-08	5,67E-08	5,67E-08	5,67E-08	5,67E-08	5,67E-08	5,67E-08	5,67E-08	5,67E-08	5,67E-08
T_{surr} [°C]	25,4	27,8	44,6	47	44,6	47	44,6	39	44,6	55
$T_{sol-aire}$ [°C]	78,91	66,92	41,59	42,50	41,59	42,50	41,57	38,88	41,62	65,88
Ecuación 6-10										

Para el desarrollo de la siguiente ecuación (6-11) se supone:

Temperatura de los alrededores : A partir de mediciones realizadas sobre el asfalto que para este caso es la temperatura percibida en las paredes (tabla 6-8), para el techo, se realiza una diferencia de 5°C sobre la temperatura ambiente ya que es la atmosfera quien rodea el techo.

Temperatura interior de la vivienda T_{inside} A partir de los datos otorgados por Energy Plus, ya que su valor depende de las condiciones establecidas en el modelo inicialmente - orientación, materiales de la envolvente, hora del día - (tabla 6-9). Los valores registrados para este ítem son altos debido a que el modelo de validación se realiza bajo la condición de hermeticidad.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_{sol-aire} - T_{inside}) \quad \text{Ecuación 6-11}$$

Tabla 6-9: Resultados de la ecuación 6-11

	TECHO		PAREDES							
			NORTE		SUR		ESTE		OESTE	
	12:00	15:00	12:00	15:00	12:00	15:00	12:00	15:00	12:00	15:00
U [W/m² · °C]	4,608	4,608	3,367	3,367	3,367	3,367	3,367	3,367	3,367	3,367
A [m²]	51,992	51,992	32,413	32,413	25,413	25,413	18,6	18,6	26,6	26,6
$T_{sol-aire}$ [°C]	78,91	66,92	41,59	42,50	41,59	42,50	41,57	38,88	41,62	65,88
T_{inside} [°C]	52,98	51,86	52,98	51,86	52,98	51,86	52,98	51,86	52,98	51,86
$\dot{Q}_{transm}$ [W] Ecuación 6-10	6.213,7	3.609,46	-1.242,51	-1.021,88	-974,17	-801,19	-714,85	-813,09	-1.017,04	1.255,82
			12:00	-3.948,57			15:00	-1.380,34		

6.6 COMPARACION DE RESULTADOS (VALIDACION Vs. ENERGY PLUS)

El modelo descrito en este capítulo, figura 6-1, se simula en Energy Plus (E+), los resultados que hacen referencia a la ganancia solar de la envolvente, se enlistan en la tabla, con el propósito de comprarlos con los resultados obtenidos en la validación.

Tabla 6-10: Comparación de resultados, validación teórica vs. Energy Plus

	VALIDACION		ENERGY PLUS		% ERROR	
	12:00	3:00	12:00	3:00	12:00	3:00
Ganancia solar a través de ventanas [kW]	2,13	1,57	1,92	1,52	10,94	3,30
Ganancia solar a través de techo [kW]	6,21	3,61	6,22	3,34	0,16	8,08
Ganancia solar a través de paredes [kW]	-3,95	-1,38	-3,95	-1,25	0,00	10,40

7. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Con la simulación computacional del edificio de Administración Central, 301, se pretende analizar el comportamiento térmico y energético del edificio, tanto en el diseño original, como con las mejoras pasivas. Para ello se utiliza el software *Energy Plus (E+)* a través del generador de diseño *DesignBuilder*

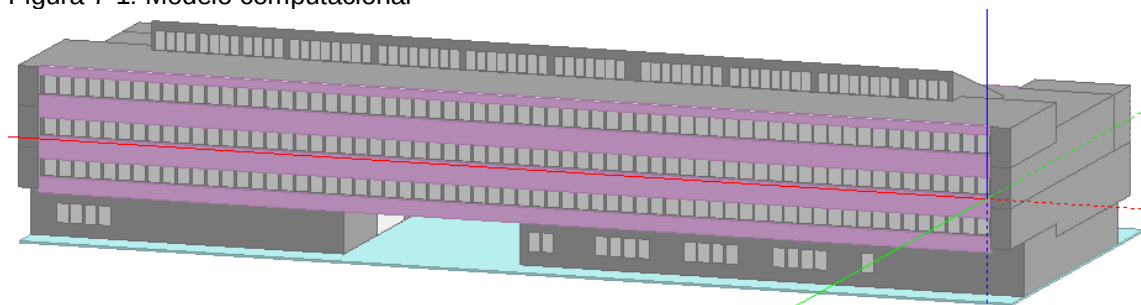
7.1 MODELO COMPUTACIONAL

7.1.1 Ubicación

Se debe de escoger el lugar de emplazamiento del edificio, en este caso es la ciudad de Cali, 3° 22' latitud Norte y 76°32' longitud Oeste, así como el fichero de datos del clima de la ciudad, ya que sobre estos datos se realizara la simulación. Los datos los provee la DOE (Departamento de Energía de Estados Unidos) por medio de la Estación Meteorológica del Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, que se encuentra ubicado a las afueras de la ciudad de Cali.

Una vez seleccionada la ciudad se orienta el edificio de acuerdo a su eje longitudinal respecto al Norte, para este caso es de 0°, figura 6-1.

Figura 7-1: Modelo computacional



7.1.2 Datos del fichero climático

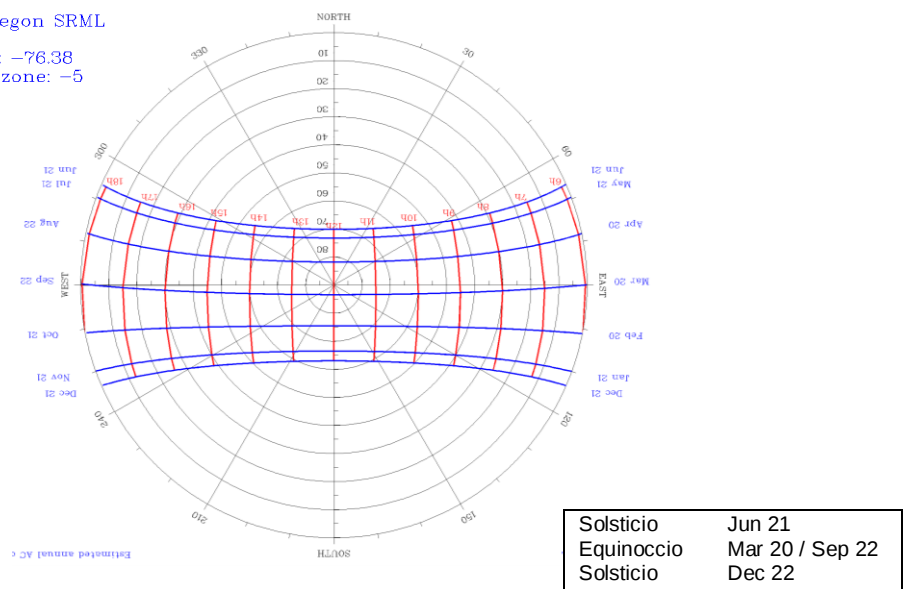
El fichero de datos de clima tiene los siguientes parámetros:

- Temperatura de bulbo seco exterior [°C]
- Temperatura de rocío exterior [°C]
- Radiación solar directa [kW]
- Radiación solar horizontal difusa [kW]
- Velocidad del viento [m/s]
- Dirección del viento [°]
- Presión atmosférica [Pa]
- Altitud solar [°]
- Acimut solar [°]

Medidos en los 365 días del año 2002, con un intervalo de 1 hora durante las 24 horas, para un total de 8760 datos. A la hora de realizar la simulación se debe tener en cuenta que las mediciones realizadas en el 2002 dependen de las condiciones climáticas de este periodo (lluvias, precipitaciones, nubosidad etc.), por ende no es adecuado escoger la fecha de simulación de acuerdo a la incidencia del Sol directa en determinada fachada y día, con la ayuda del mapa estereográfico, figura 7-2, sino de acuerdo a la temperatura de bulbo seco, la cual según el clima de Cali sería, la temperatura más alta registrada en un lapso de tiempo.

Figura 7-2: Mapa solar para la latitud 3,55°N.

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: BPA
Lat: 3.55; Long: -76.38
(Solar) time zone: -5

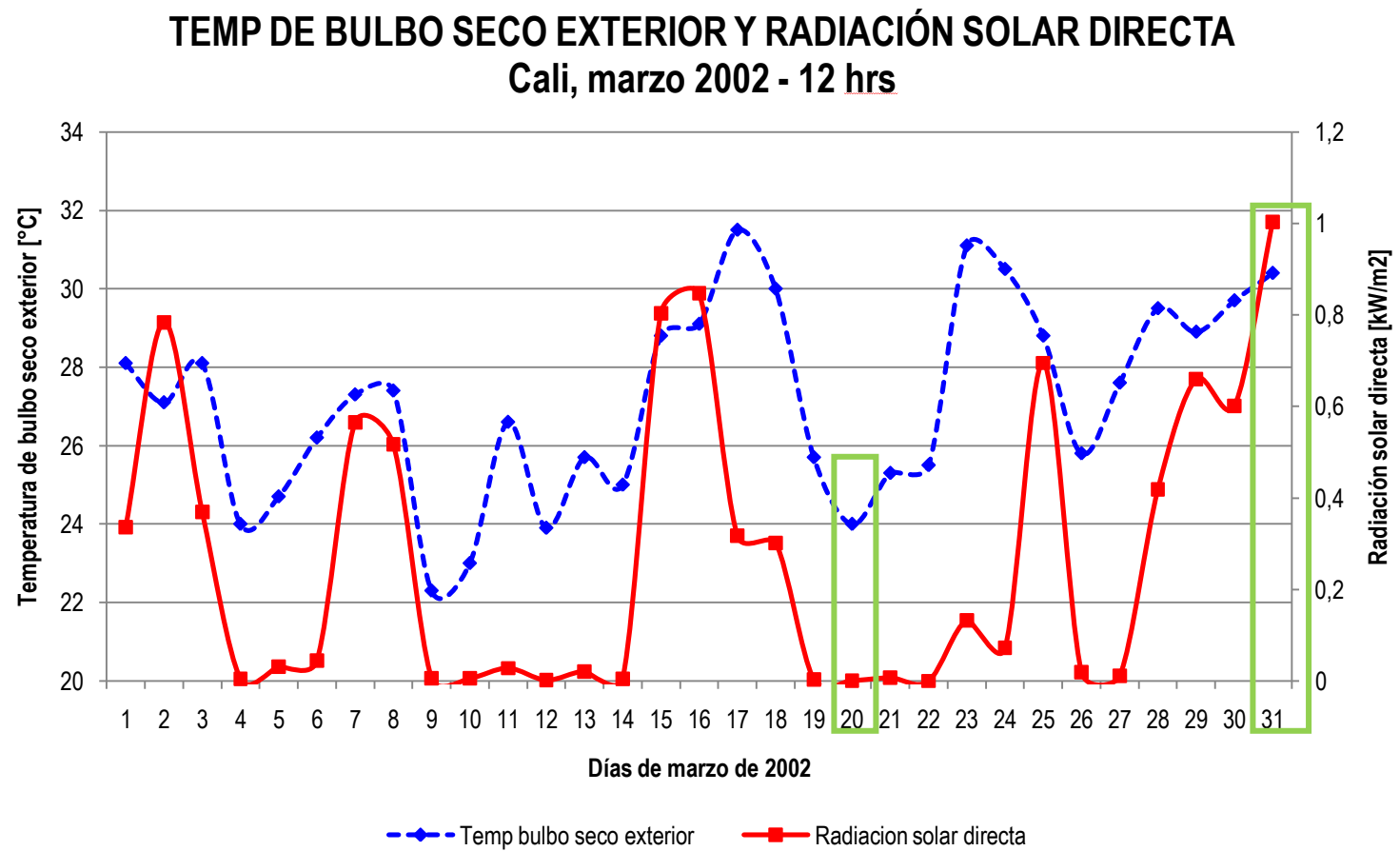


Revisando los datos, provenientes de la estación meteorológica del aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón el cual queda a las afueras de la ciudad de Cali, para el mes de marzo de 2002 a las 12.00 p.m., tabla 7-1, se observa la diferencias de temperatura de bulbo seco entre el día de equinoccio, marzo 21 y el día crítico, marzo 31.

Tabla 7-1: Fichero del Clima para la ciudad de Cali en marzo de 2002 - 12:00 p.m.

Días marzo 2002	Temp de Bulbo Seco Exterior [°C]	Temp de Rocío Exterior [°C]	Radiación Solar Normal Directa [kW/m2]	Radiación Solar Horizontal Difusa [kW/m2]	Vel del Viento [m/s]	Dirección del Viento [°]	Presión Atmosf [Pa]	Altitud Solar [°]	Acimut Solar [°]
1	28,1	17	0,336	0,451	2,2	92	91284	78,29	163,90
2	27,1	16,8	0,784	0,299	0,8	96	90988	79,05	163,25
3	28,1	18	0,37	0,439	0,2	91	90854	79,43	162,91
4	24	18,6	0,005	0,299	0,5	95	90586	79,82	162,55
5	24,7	17,8	0,031	0,387	0,3	82	90727	80,20	162,18
6	26,2	19,3	0,044	0,449	2,4	81	90724	80,59	161,78
7	27,3	17,1	0,565	0,345	4,4	148	91380	80,98	161,36
8	27,4	18,1	0,517	0,414	0,4	74	90938	81,36	160,91
9	22,3	18,2	0,006	0,264	1,1	39	90893	81,75	160,43
10	23	21,6	0,006	0,234	0,6	102	90495	82,15	159,91
11	26,6	20,5	0,028	0,35	0,1	101	90684	82,54	159,35
12	23,9	20,9	0,002	0,18	0,8	73	90423	82,93	158,74
13	25,7	16,6	0,021	0,425	0,4	110	90743	83,32	158,07
14	25	21,9	0,005	0,32	1,7	107	90609	83,71	157,32
15	28,8	17,2	0,804	0,231	0,8	352	91566	84,10	156,48
16	29,1	17,1	0,847	0,203	3,8	77	91646	84,49	155,54
17	31,5	17,4	0,317	0,422	1,3	43	91187	84,88	154,47
18	30	18	0,302	0,471	0,1	16	91193	85,27	153,22
19	25,7	22	0,003	0,194	0,1	100	90512	85,66	151,77
20	24	22	0,001	0,163	0,9	35	90406	86,04	150,05
21	25,3	20,5	0,007	0,277	0,1	63	90570	86,42	147,98
22	25,5	22	0	0,114	1,4	163	90385	86,79	145,43
23	31,1	21	0,132	0,461	6,7	58	91238	87,16	142,23
24	30,5	17,3	0,072	0,38	3,4	91	91224	87,51	138,13
25	28,8	18,1	0,695	0,304	1,1	32	91561	87,85	132,73
26	25,8	18,7	0,019	0,311	2,7	13	90695	88,15	125,45
27	27,6	21,8	0,011	0,337	0,5	138	90605	88,42	115,51
28	29,5	17,5	0,419	0,418	2,2	108	91365	88,63	102,13
29	28,9	17,1	0,66	0,327	0,9	77	91555	88,73	85,46
30	29,7	19,1	0,601	0,369	1,7	72	91400	88,73	85,46
31	30,4	18,3	1,003	0,121	0,9	107	91783	88,72	67,58

Figura 7-3: Radiación solar normal directa y Temperatura de bulbo seco en marzo de 2002 a las 12.00 pm

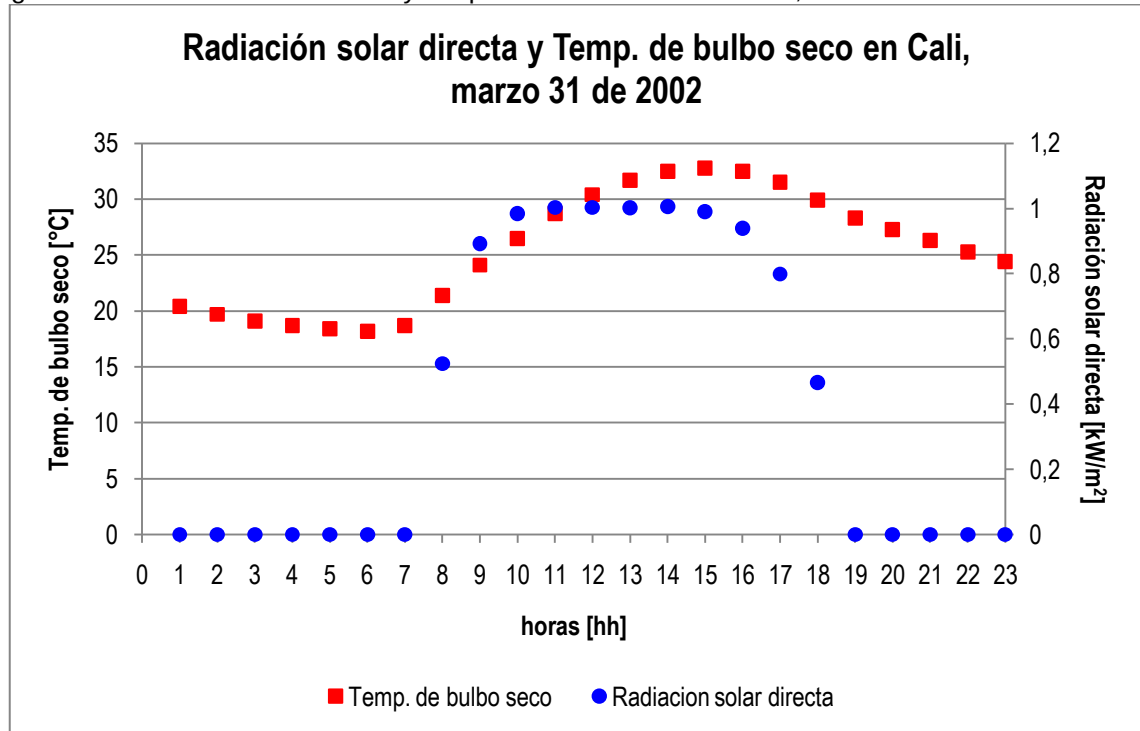


Como se observa en la figura 7-3, la radiación solar para los días cercanos a la fecha de equinoccio a las 12 p.m., es casi nula debido a las condiciones climáticas que hubieron en esa fecha, aunque debería ser lo contrario, como es en el día 31 de marzo en donde indica que la radiación solar medida concuerda con la altura solar. Lo anterior se enlista en la siguiente tabla:

Tabla 7-2: Fichero del Clima para la ciudad de Cali en marzo 31 de 2002.

Marzo 31 2002	Temp de Bulbo Seco Exterior [°C]	Temp de Rocío Exterior [°C]	Radiación Solar Normal Directa [kW/m ²]	Radiación Solar Horizontal Difusa [kW/m ²]	Vel Vient o [m/s]	Dirección del Viento [°]	Presión Atmosf [Pa]	Altitud Solar [°]	Acimut Solar [°]
00:00	21,1	19,4	0	0	1,1	100	91579	-82,69	350,02
01:00	20,4	19,1	0	0	0,7	162	91596	-74,24	61,33
02:00	19,7	18,8	0	0	0,4	312	91613	-60,23	75,49
03:00	19,1	19,1	0	0	0,3	314	91630	-45,57	80,56
04:00	18,7	18,7	0	0	0,3	326	91647	-30,74	83,17
05:00	18,4	18,3	0	0	0,1	303	91664	-15,85	84,78
06:00	18,2	18,2	0	0	0,4	307	91681	-0,93	85,89
07:00	18,7	18,7	0	0,031	1,1	207	91698	14,01	86,72
08:00	21,4	20,1	0,524	0,133	0,4	94	91715	28,96	87,35
09:00	24,1	20,4	0,892	0,082	0,6	161	91732	43,92	87,81
10:00	26,5	18,8	0,984	0,082	1,3	182	91749	58,88	88,06
11:00	28,7	18,4	1,003	0,104	0,4	156	91766	73,84	87,74
12:00	30,4	18,3	1,003	0,121	0,9	107	91783	88,72	67,58
13:00	31,7	17,9	1,002	0,125	0,8	123	91800	76,21	272,48
14:00	32,5	18,2	1,006	0,108	3,4	49	91761	61,25	271,92
15:00	32,8	18,7	0,991	0,092	2	110	91722	46,29	272,13
16:00	32,5	18	0,939	0,077	3,8	77	91684	31,33	272,57
17:00	31,5	17,7	0,799	0,07	2,2	85	91645	16,37	273,17
18:00	29,9	18,1	0,467	0,05	2,4	76	91607	1,43	273,96
19:00	28,3	18,4	0	0	2,4	82	91568	-13,49	275,02
20:00	27,3	19,5	0	0	1,4	98	91530	-28,39	276,53
21:00	26,3	18,3	0	0	0,7	54	91491	-43,23	278,92
22:00	25,3	17,9	0	0	0,4	80	91453	-57,93	283,41
23:00	24,4	17,9	0	0	0,9	75	91414	-72,13	294,99

Figura 7-4: Radiación solar directa y temperatura de bulbo seco Cali, 31 de marzo de 2002



De acuerdo a la figura 6-4, además de presentarse la coincidencia de la radiación solar directa medida respecto a la altura solar, se observa que a lo largo de la tarde la radiación solar se mantuvo en el rango de la radiación medida a las 12:00 p.m., como también la temperatura de bulbo seco, la cual se mantuvo alta.

El mismo método de análisis se realizó para el mes de septiembre, en el cual también hay equinoccio, pero se encontró que hubo muchas variaciones en la radiación solar, debido a que en ese mes el clima repercutió de manera desfavorable.

Por lo anterior se decide que el día conveniente para simular el Edificio de 301, de Administración Central, es en fecha, **31 de marzo** de 2002

De acuerdo al análisis citado (grafica 7-4) la hora critica es 12:00 p.m. y 3:00 p.m, figuras 7-5 y 7-6 respectivamente

Figura 7-5: Orientación del Sol respecto al Edificio 301. Hora:
12:00 p.m

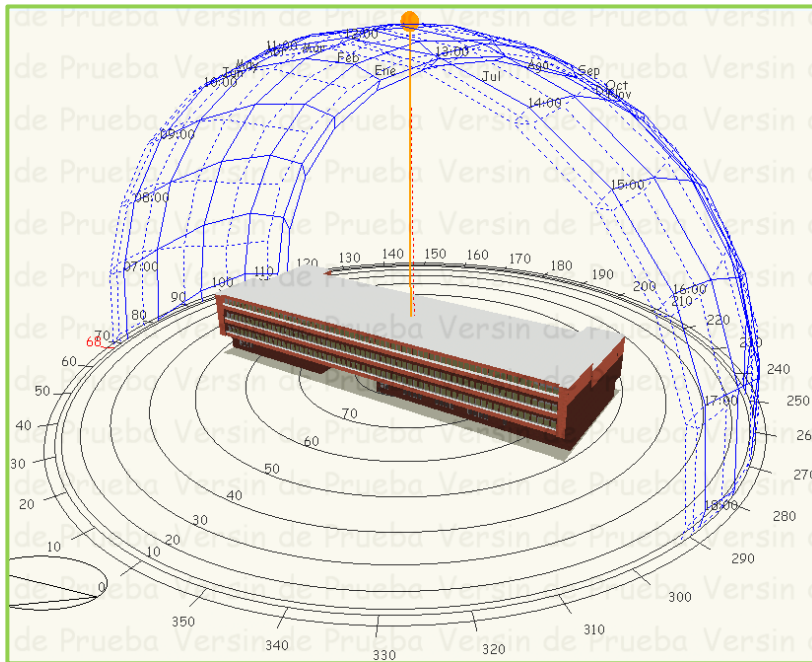
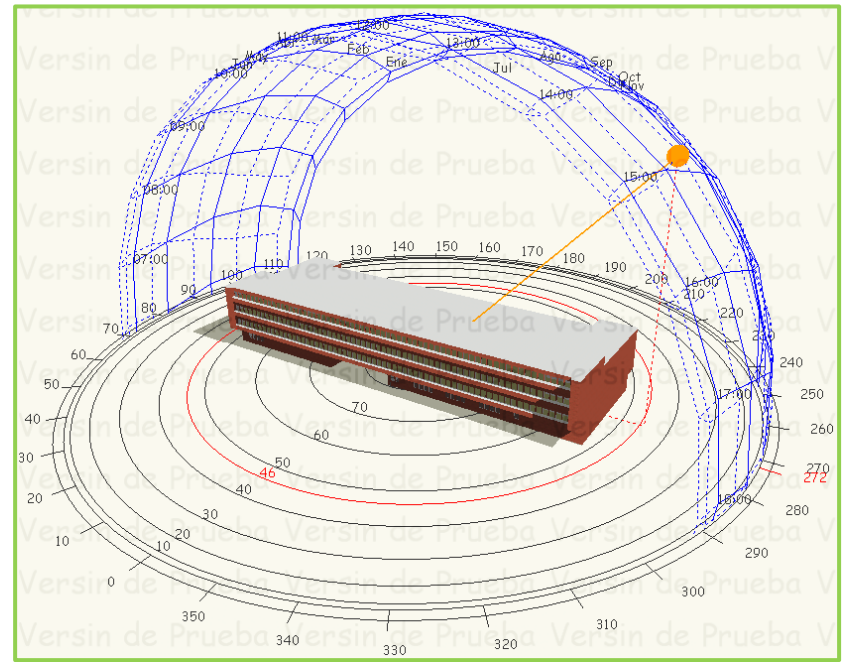


Figura 7-6: Orientación del Sol respecto al Edificio 301. Hora:
3:00 p.m.



7.1.3 Configuración

Cada piso del Edificio 301 se divide en zonas térmicas las cuales se definen según su uso:

- **Corredor:** Espacio en el que circulan las personas, para este caso, la densidad de ocupación es muy baja.
- **Oficina:** Lugar donde se halla el personal y se desarrollan las actividades. Debido a que los materiales, los ocupantes y el tipo de actividad, son iguales en todas las oficinas, se toman todas ellas como una sola, agrupándolas según su orientación Norte [N] o Sur [S],
- **Espacios de no uso:** Baños, cocinas, bodegas. En vista de la inhabitabilidad no es de importancia tenerla en cuenta en la simulación.

La simulación del Edificio 301 se concentrara en las oficinas, ya que es ahí donde se desarrollan las actividades, el personal y por ende es importante analizar el confort térmico, mediante Energy Plus.

A continuación se ilustran las zonas térmicas, sobre el modelo computacional, en los diferentes pisos del Edificio 301, figuras 5-7 y 5-8.

Figura 7-7: Clasificación de las zonas térmicas del edificio. a) 1º Piso oeste, b) 1º Piso este, c) 2º Piso

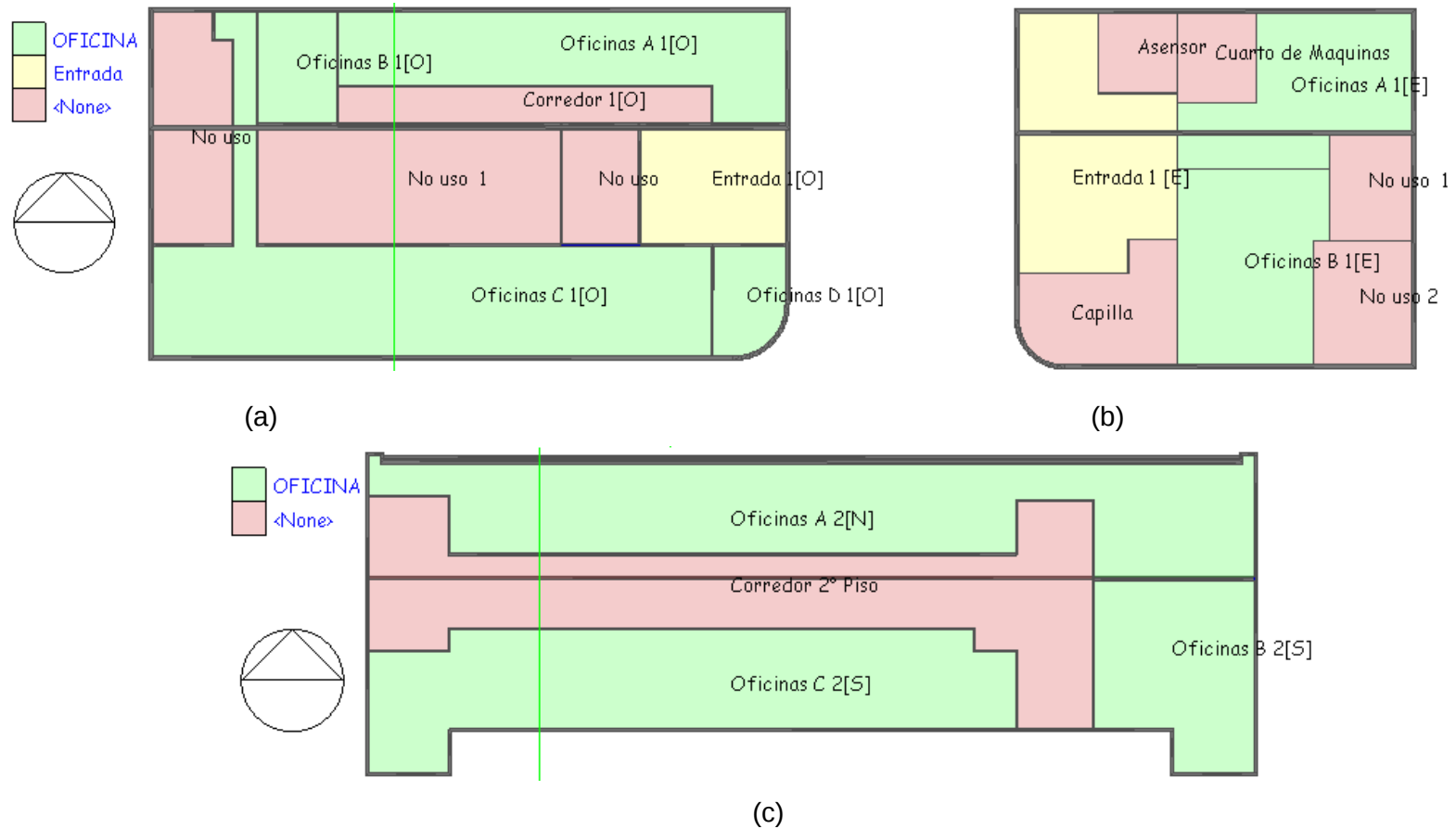
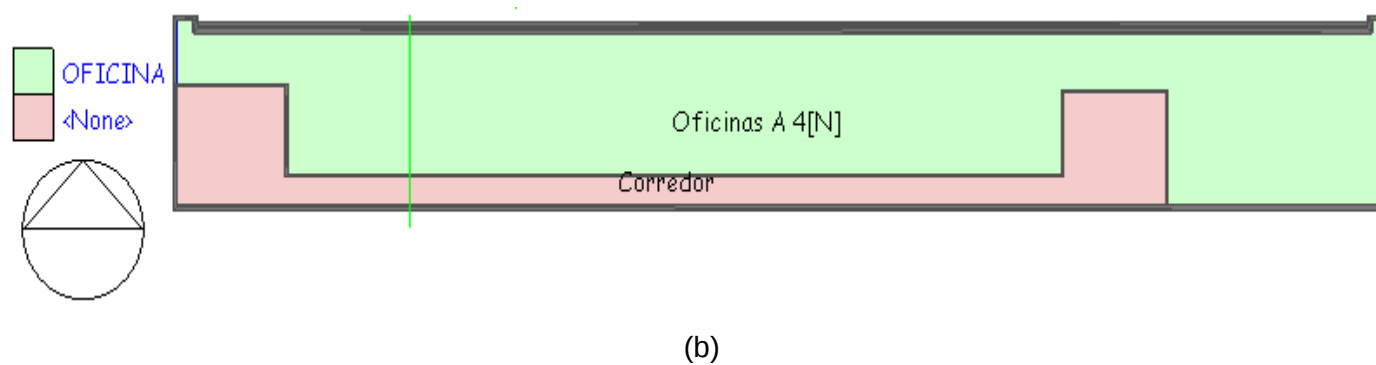
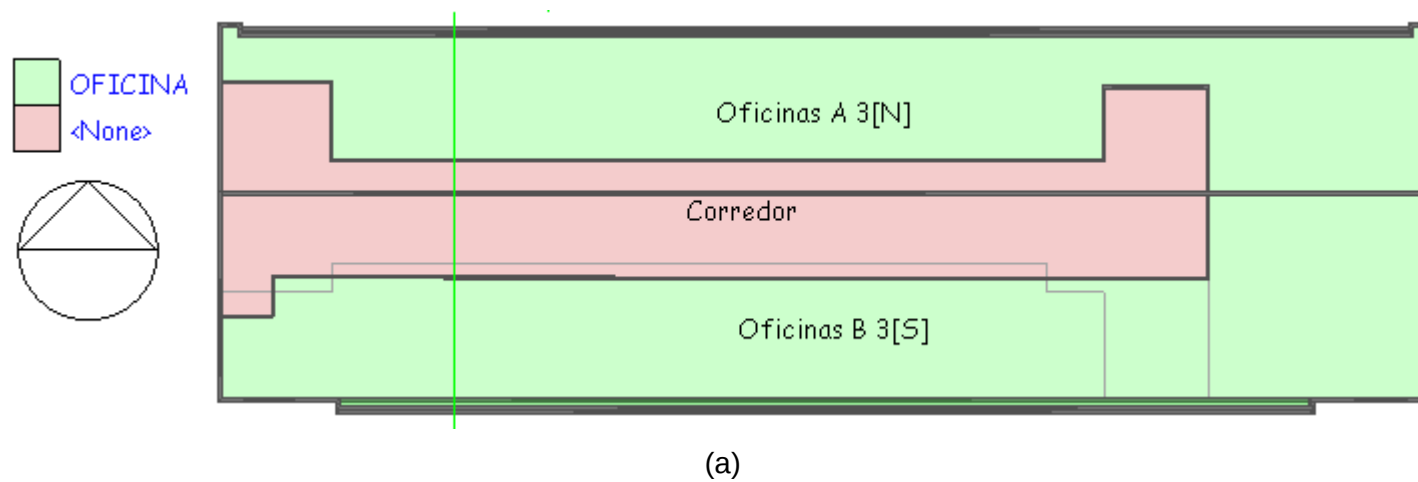


Figura 7-8: Clasificación de las zonas térmicas del edificio. A) 3º Piso oeste, B) 4º Piso



7.1.4 Ocupación del edificio

De acuerdo a las anteriores figuras (5-7 y 5-8), se establece para cada zona, la densidad de personas y la carga térmica debido a los computadores e iluminación

Tabla 7-3: Densidad de personal y carga térmica debido a computadores e iluminación.

ZONAS	Area [m ²]	CANT. PERSONAL	DENSIDAD [personas/m ²]	CANT PC's	CARGA [W/m ²] Watt/PC:250	LUMEN lux oficina:400	CANT BOMBILLOS Bombillo 15W:900lm	CARGA [W/m ²] Bombillo: 15W
A1 [E]	104.71	10	0.096	10	23.876	41,884	47	0.444
B1 [E]	110.61	10	0.090	10	22.601	44,246	49	0.444
A1 [O]	147.08	20	0.136	20	33.995	58,833	65	0.444
B1 [O]	36.85	5	0.136	5	33.923	14,739	16	0.444
C1 [O]	276.76	25	0.090	25	22.583	110,704	123	0.444
D1 [O]	32.85	2	0.061	2	15.219	13,141	15	0.444
A2 [N]	643.43	50	0.078	50	19.427	257,371	286	0.444
B2 [S]	224.12	15	0.067	15	16.732	89,647	100	0.444
C2 [S]	528.82	35	0.066	35	16.546	211,526	235	0.444
A3 [N]	645.47	40	0.062	40	15.493	258,187	287	0.444
B3 [S]	706.02	40	0.057	40	14.164	282,406	314	0.444
A4 [N]	637.31	15	0.024	15	5.884	254,925	283	0.444

En lo relacionado al calor generado por el personal de las zonas del Edificio 301, se establecen los factores “humanos” que inciden sobre el confort térmico, en la siguiente tabla (7-4).

Tabla 7-4: Factores “humanos” incidentes en el confort térmico

TASA METABOLICA [W/persona]	130 ^[1]
NIVEL DE ACTIVIDAD (met)	0.9 ^[2]
CARACTERISTICAS DE LA ROPA (clo)	0.8 ^[3]
PERFIL HORARIO OCUPACION	9:00 a.m. a 6:00 p.m.
HORARIO	Domingo a Domingo

Una observación a la tabla 7-4 es que el **horario** que se establece es domingo a domingo, debido a que, como se indicó en el numeral 5.1.2, grafica 5-4, el día crítico según el fichero de clima es el domingo (31 de marzo).

7.1.5 Materiales

El sistema constructivo del Edificio 301 (Administración Central), con sus respectivas resistencias térmicas, está agrupado en:

Tabla 7-5: Sistema constructivo del Edificio 301

	MATERIALES	R [m ² *C/W]
FACHADA EXTERIOR	Ladrillo	0,120
	Mortero, 13 mm	0,018
	Estuco, 25 mm	0,037
FACHADA INTERIOR	Ladrillo	0,120
	Estuco	0,037
	Panel Yeso, 13 mm	0,039
PISO Y/O TECHO	Concreto, 200 mm, LOSA	0,120
	Estuco	0,037
	Baldosa	0,012
	Concreto, 400 mm, TECHO	2.34
	Teja de barro	0.18

La ventana es de vidrio sencillo, de espesor= **6 mm** y Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC) = **0,826**. La ventanearía se mantiene totalmente abierta en el transcurso del día.

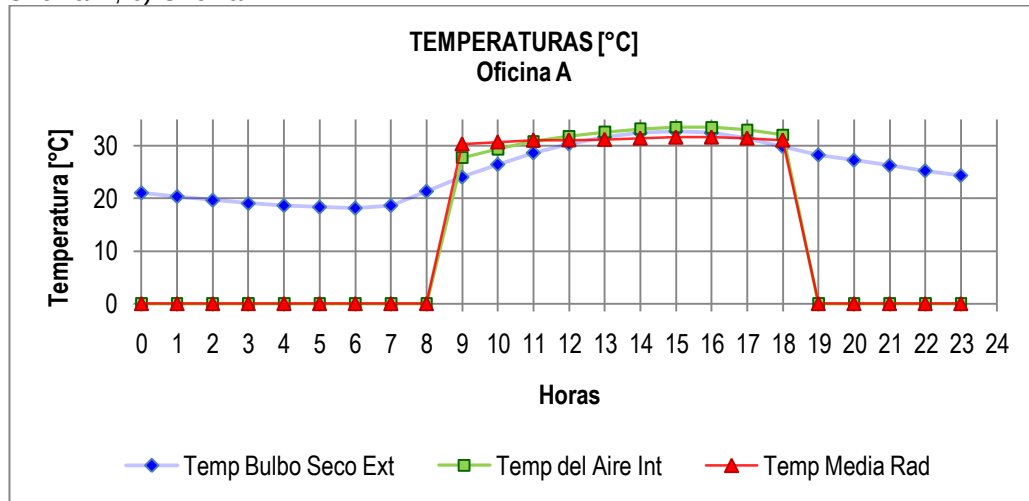
La reflejancia (ρ) del suelo exterior es de **0.25**

7.1.6 Resultados

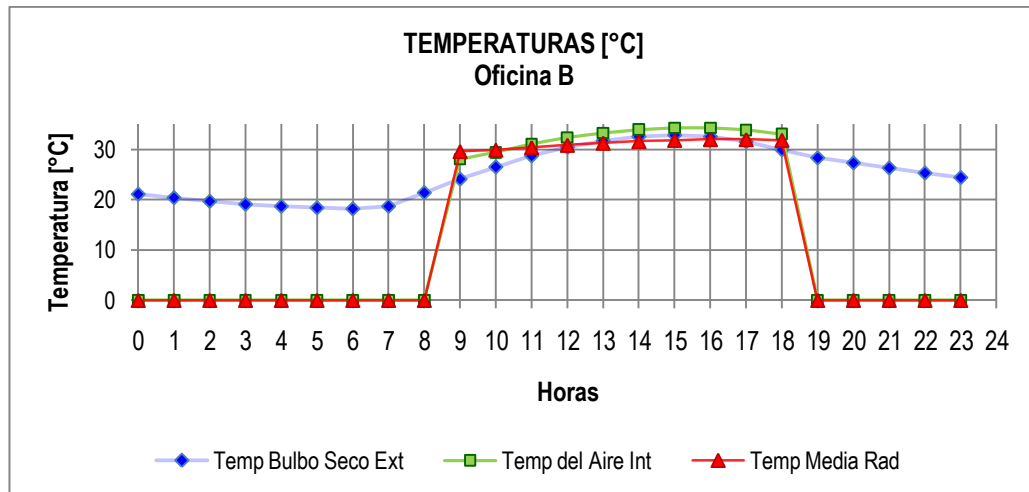
A partir de la descripción que se hizo del Edificio 301, ubicación, fecha de modelamiento, envolvente y ocupación, se analiza: La temperatura radiante y del aire, confort, ganancia térmica sobre la envolvente e iluminación natural en cada una de las zonas térmicas, figuras 7-7 y 7-8, (páginas 56 y 57).

- **TEMPERATURAS:** Temperatura Media Radiante, Temperatura de bulbo seco exterior y Temperatura del aire. Para los análisis presentados a continuación, no se hace sobre la temperatura de bulbo seco exterior, ya que su variación no tiene nada que ver con la edificación.

Figura 7-9: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior. Primer piso *lado este*, a) Oficina A, b) Oficina B.

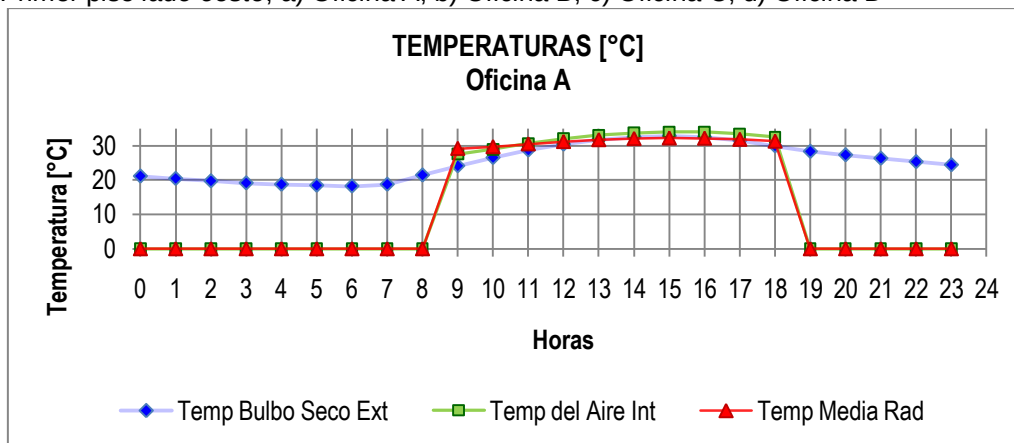


(a)

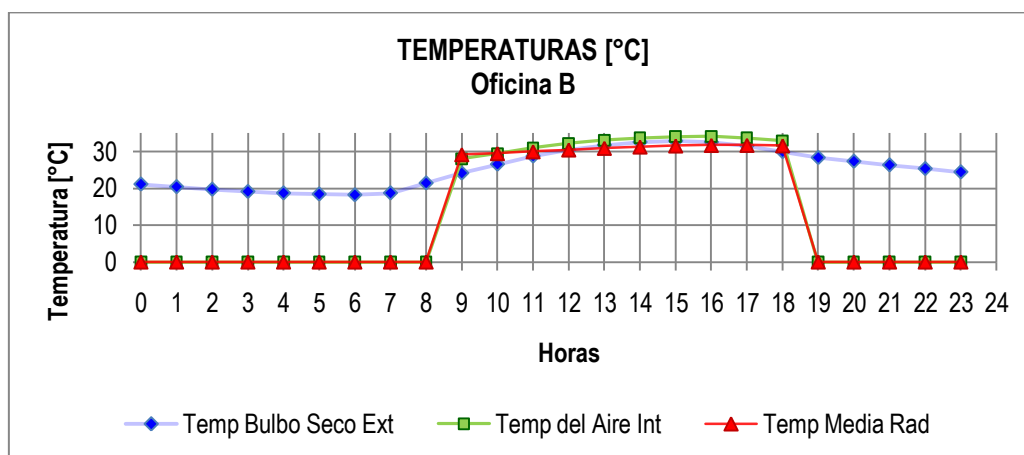


(b)

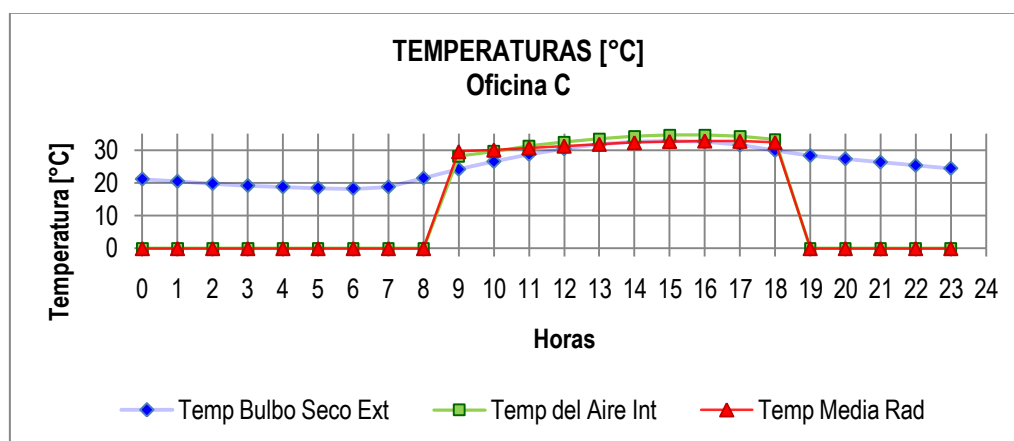
Figura 7-10: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Primer piso *lado oeste*, a) Oficina A, b) Oficina B, c) Oficina C, d) Oficina D



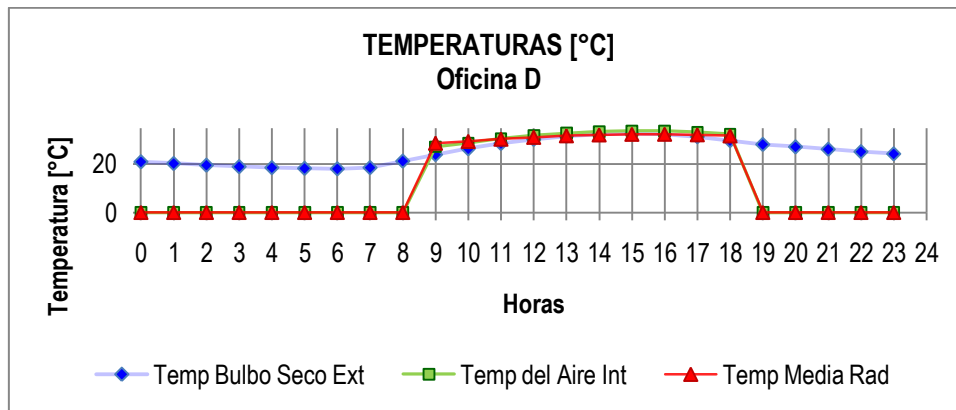
(a)



(b)

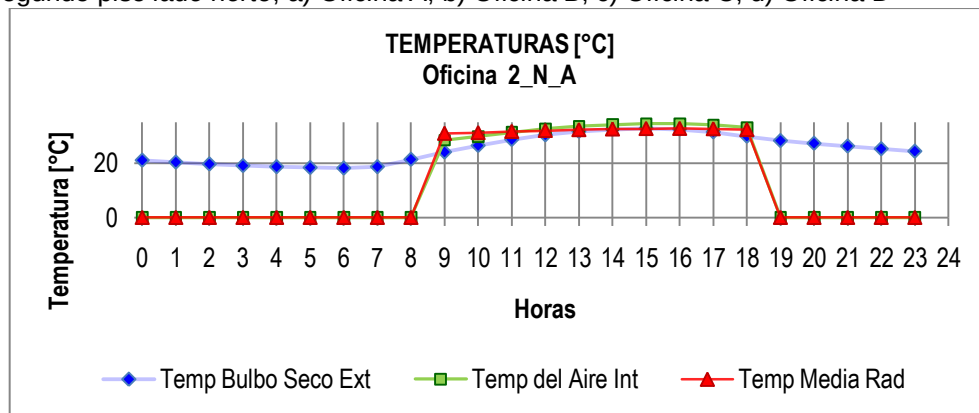


(c)



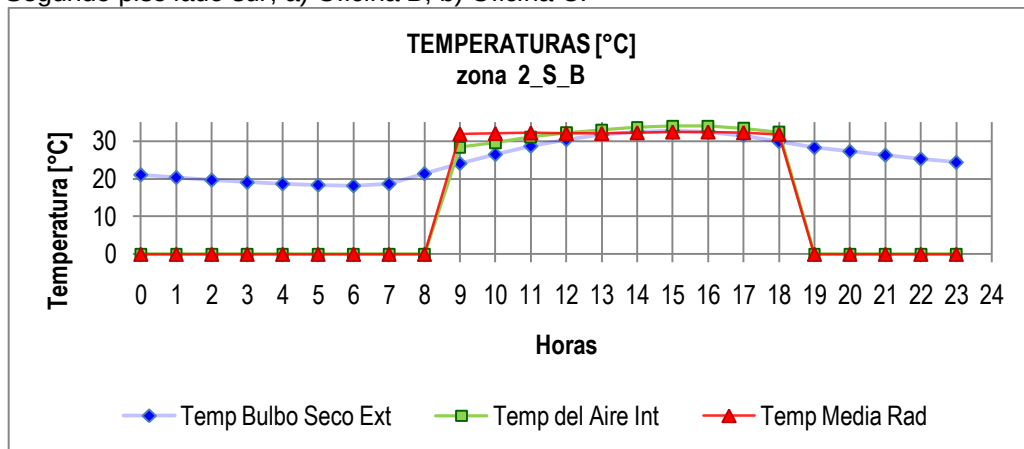
(d)

Figura 7-11: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Segundo piso *lado norte*, a) Oficina A, b) Oficina B, c) Oficina C, d) Oficina D

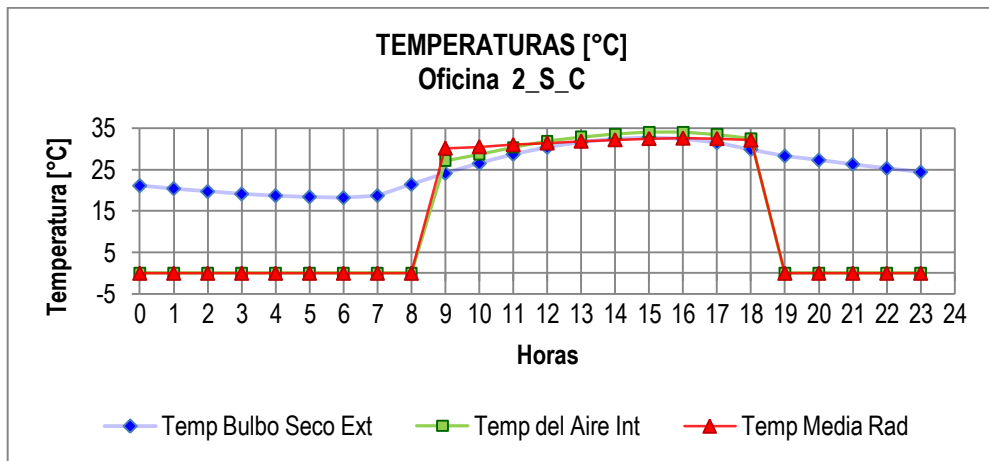


(a)

Figura 7-12: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Segundo piso *lado sur*, a) Oficina B, b) Oficina C.



(a)



(b)

Figura 7-13: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Tercer piso.

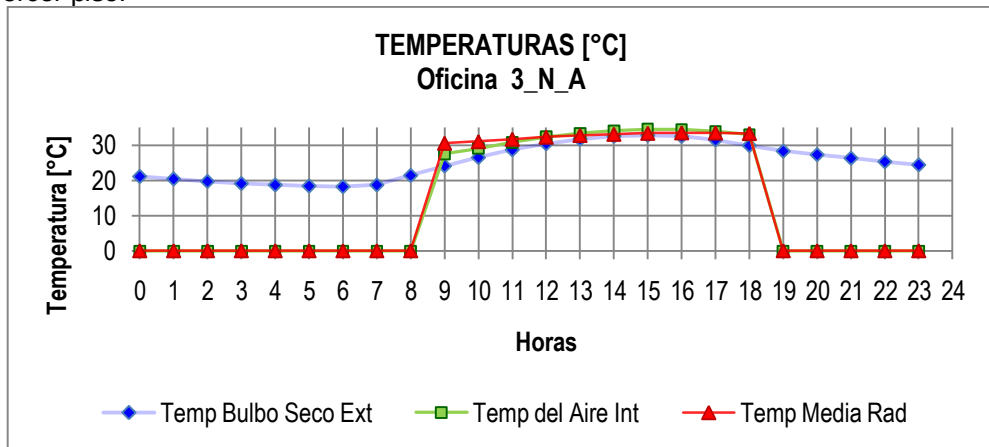
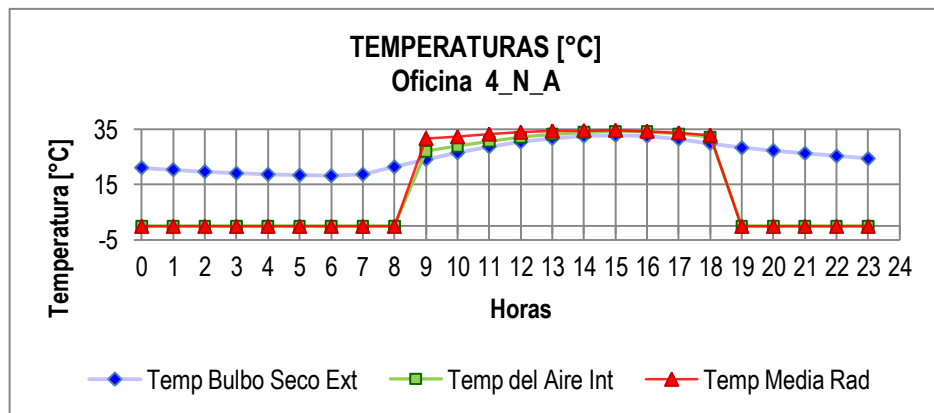


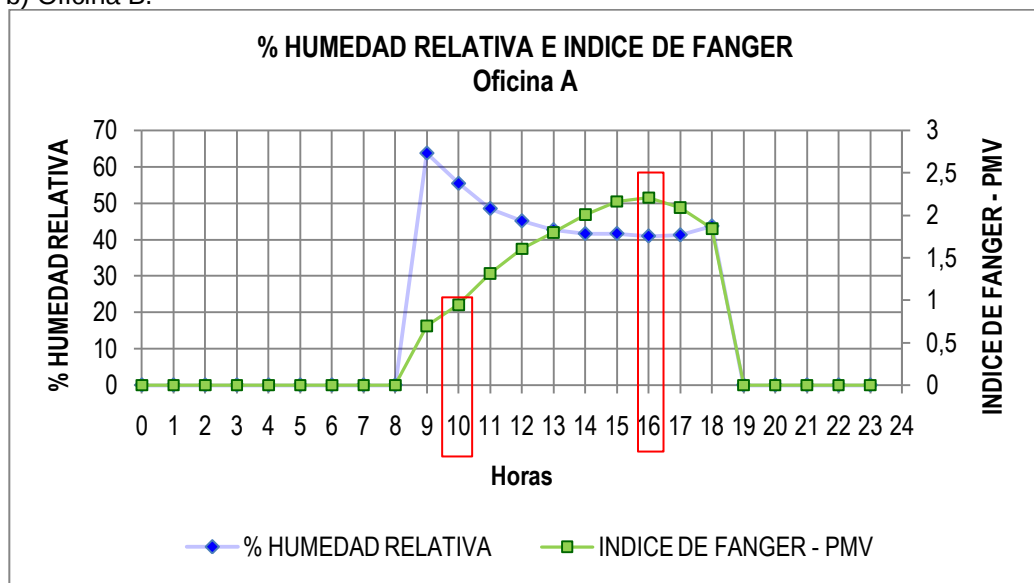
Figura 7-14: Temperatura de bulbo seco, radiante, aire interior, marzo 31 de 2002. Cuarto piso.

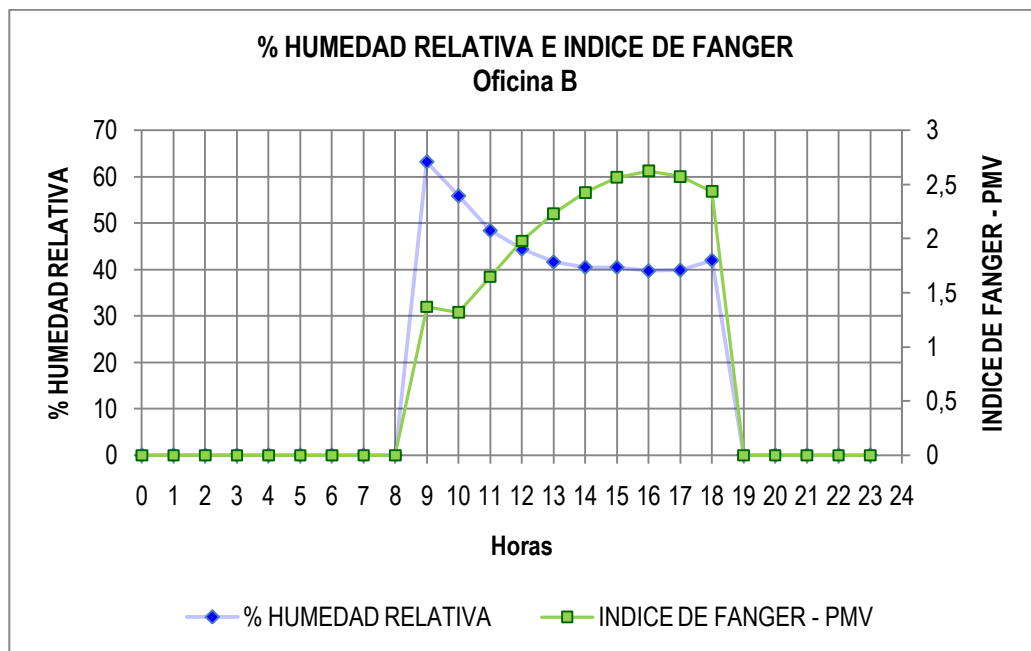


$T_{\text{aire interior}}$ es superior T_{radiante} en todas las gráficas excepto las correspondientes al tercer y cuarto piso. Esto supone que el calor generado por los equipos de oficina, lámparas y personal, al interior del espacio no está siendo removido, por tanto el principal problema en estas zonas es la remoción de calor. En lo relacionado al tercer y cuarto piso la temperatura radiante es superior a la del aire interior, queriendo decir que el calor se debe principalmente a la radiación emitida por las superficies, esto como resultado a que en ambas zonas el Sol incide de manera directa sobre el techo.

% HUMEDAD RELATIVA Y CONFORT: %Humedad Relativa e Indice de Fanger

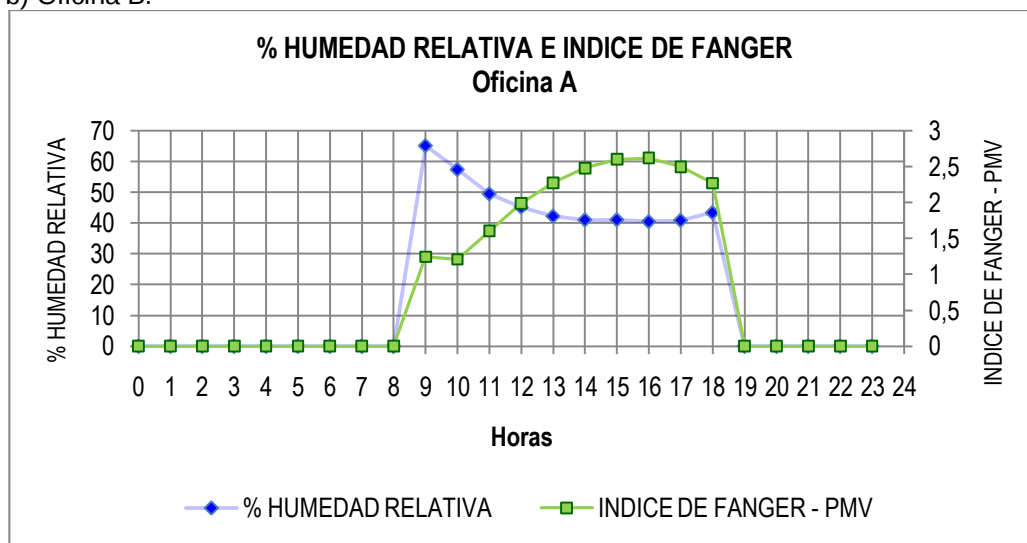
Figura 7-15: % Humedad Relativa e Indice de Fanger. Primer piso *lado este*, a) Oficina A, b) Oficina B.



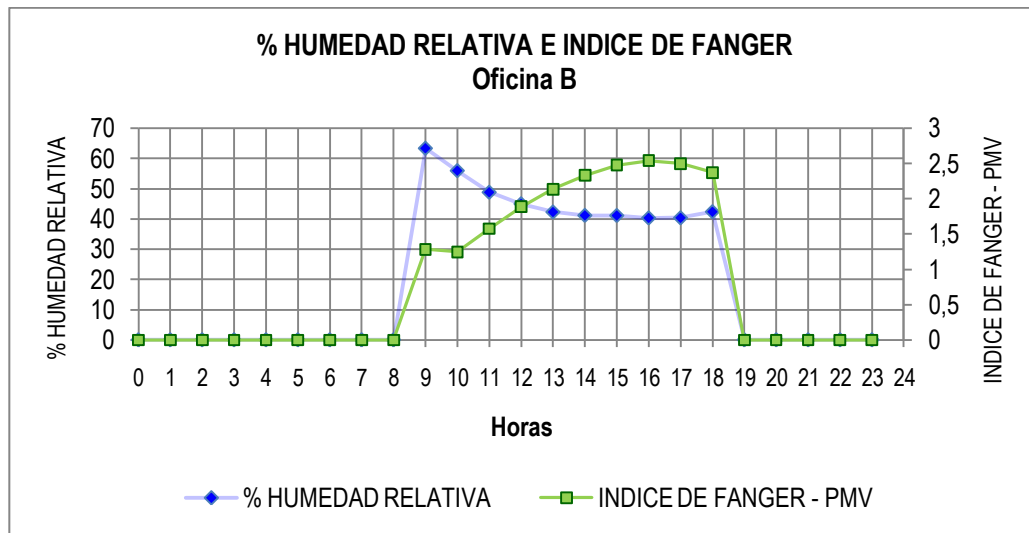


(b)

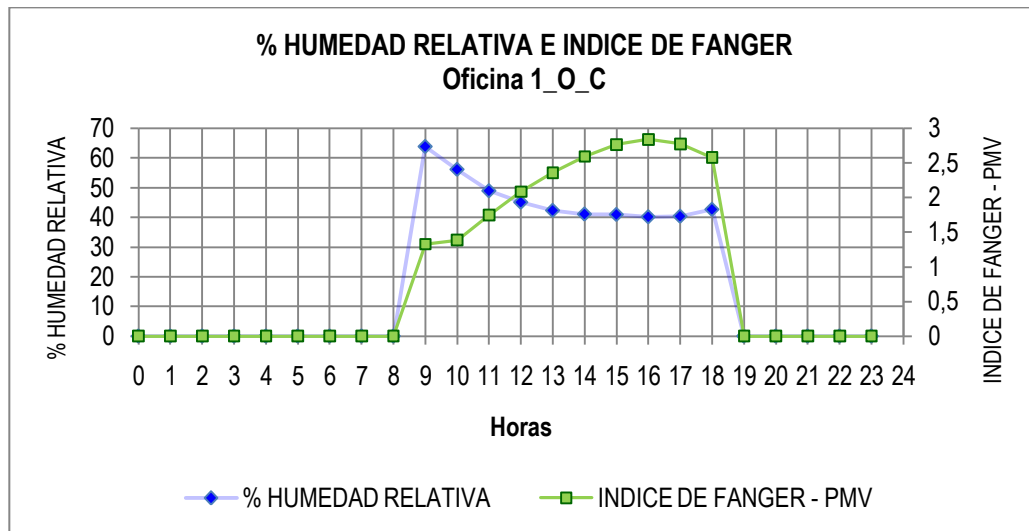
Figura 7-16: % Humedad Relativa e Indice de Fanger. Primer piso *lado oeste*, a) Oficina A, b) Oficina B.



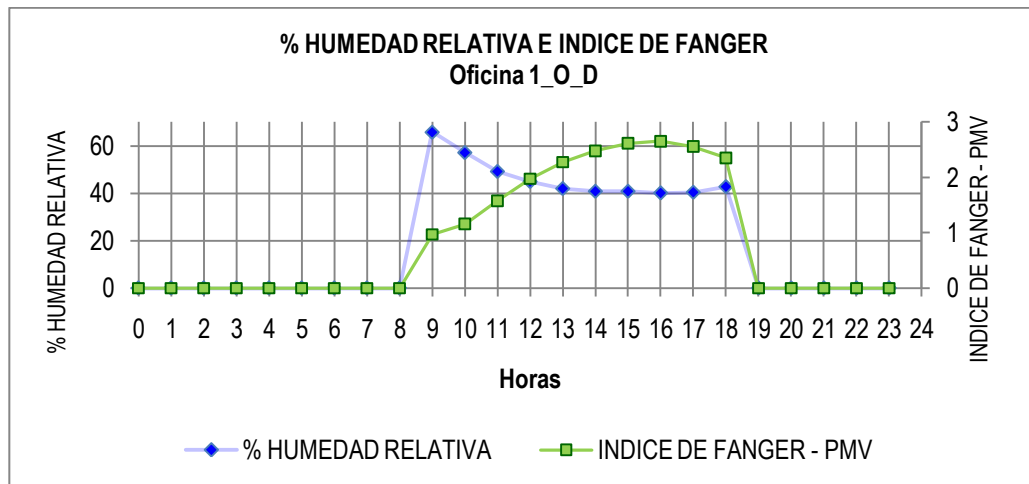
(a)



(b)

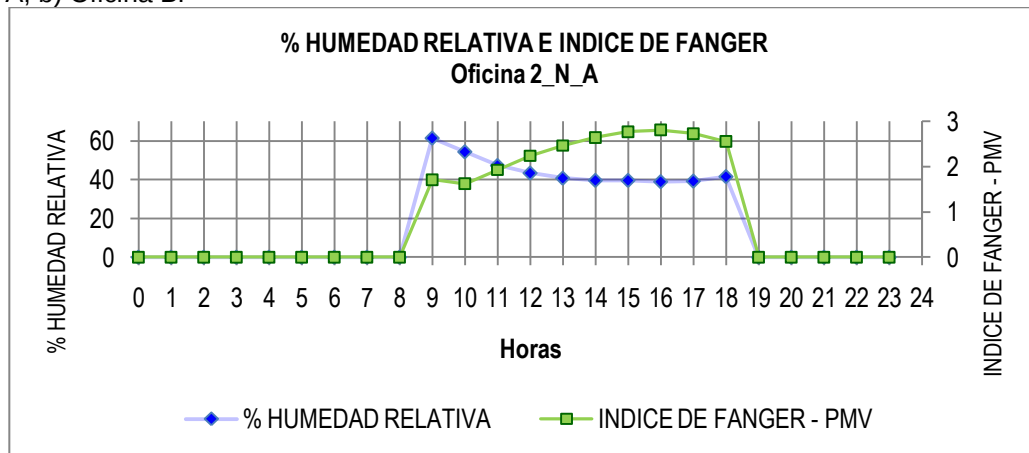


(c)



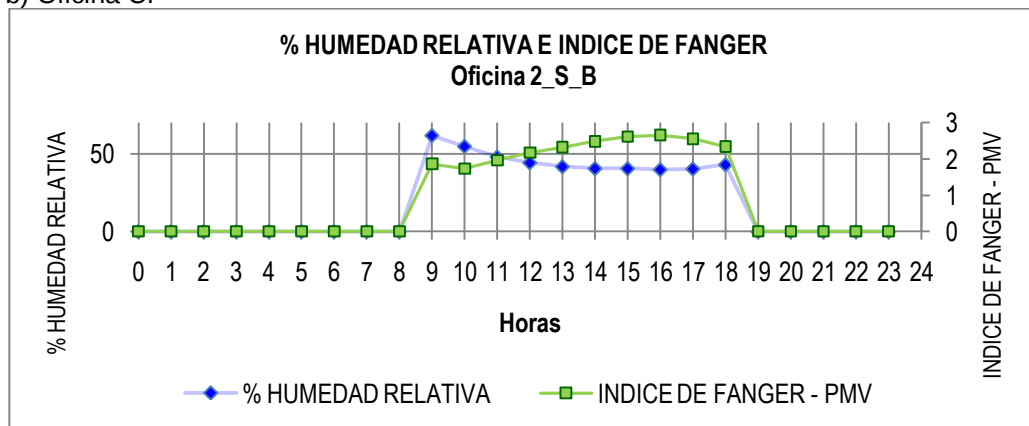
(d)

Figura 7-17: % Humedad Relativa e Indice de Fanger. Segundo piso *lado norte*, a) Oficina A, b) Oficina B.

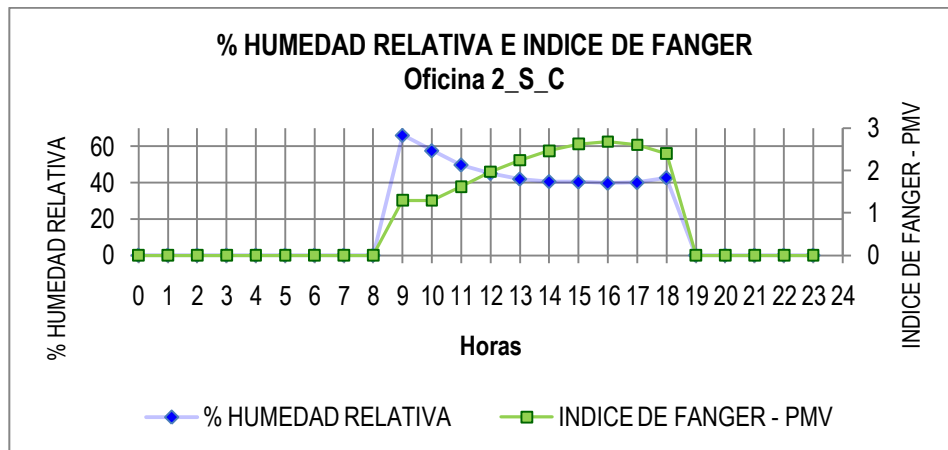


(a)

Figura 7-18: % Humedad Relativa e Indice de Fanger. Segundo piso *lado sur*, a) Oficina B, b) Oficina C.



(a)



(b)

Figura 7-19: % Humedad Relativa e Indice de Fanger. Tercer piso.

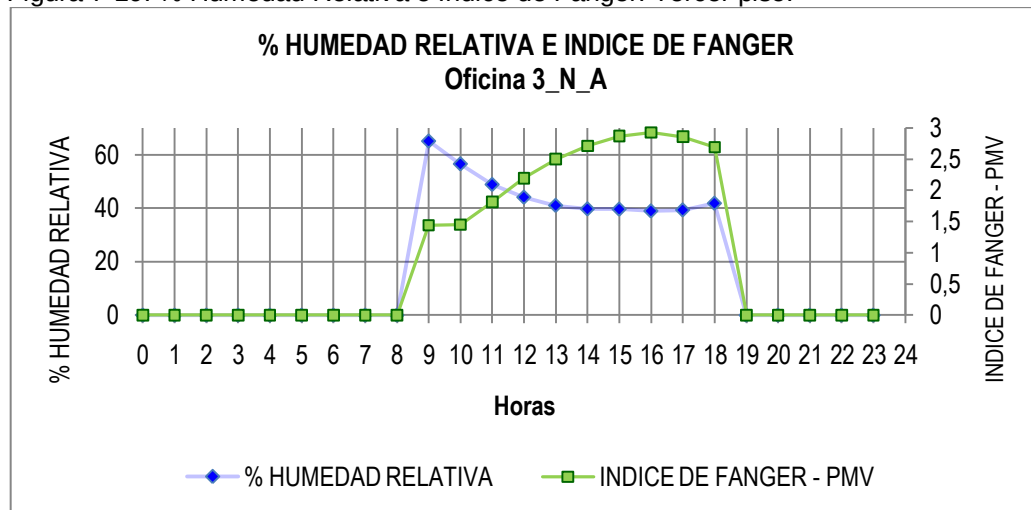
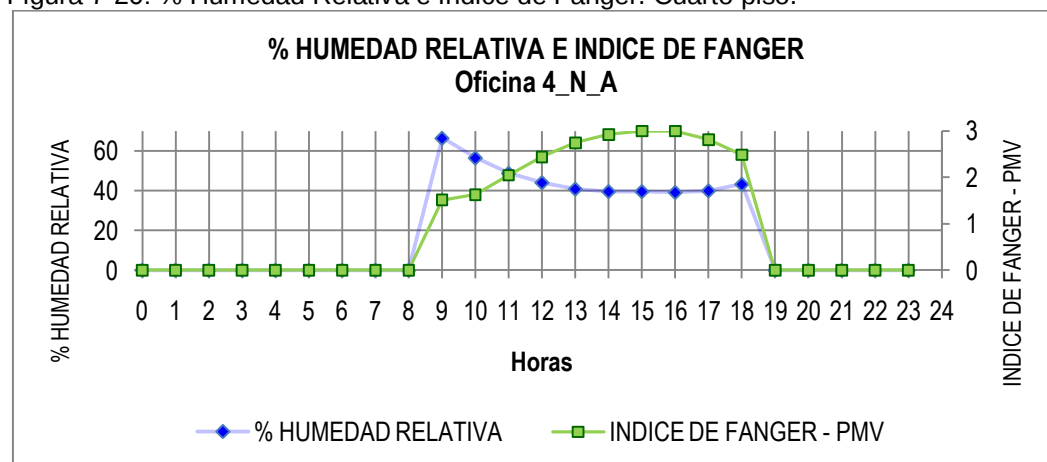


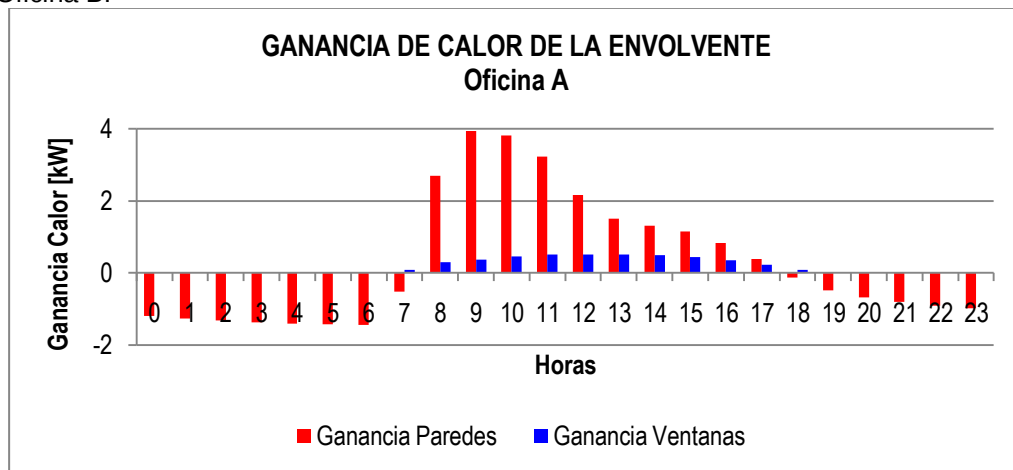
Figura 7-20: % Humedad Relativa e Indice de Fanger. Cuarto piso.



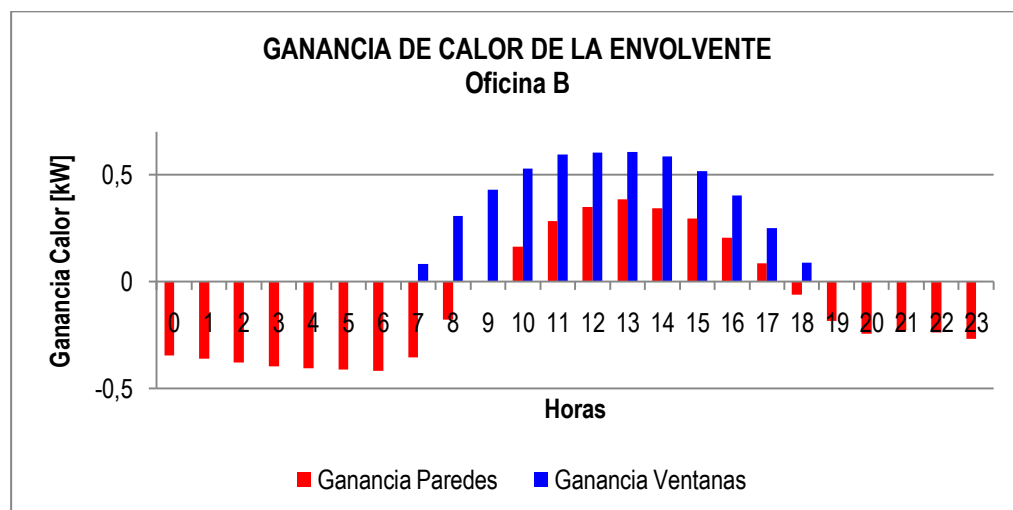
Desde que inicia la jornada laboral, el índice de Fanger está por encima del límite de confortabilidad (0.5), alcanzando su valor pico a las 16 horas con un PMV mayor a 2.5 y HR alrededor de 40%. Por tanto la inconfortabilidad es crítica entre las 15 y 16 horas.

GANANCIA TERMICA DE LA ENVOLVENTE: Se analiza sobre paredes y ventanas para el 1° y 2° piso, para el 3° y 4° se tiene en cuenta el techo ya que el Sol da de manera directa sobre este.

Figura 7-21: Ganancia térmica de la envolvente. Primer piso *lado este*, a) Oficina A, b) Oficina B.

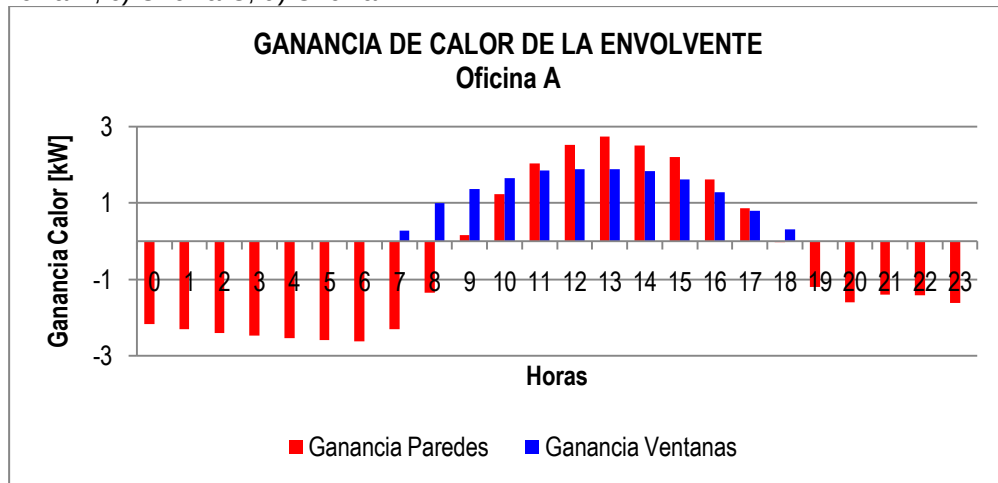


(a)

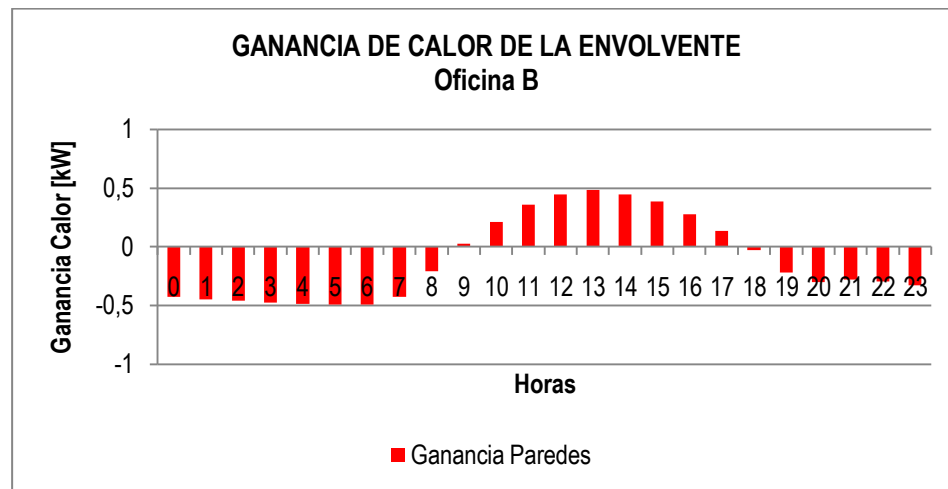


(b)

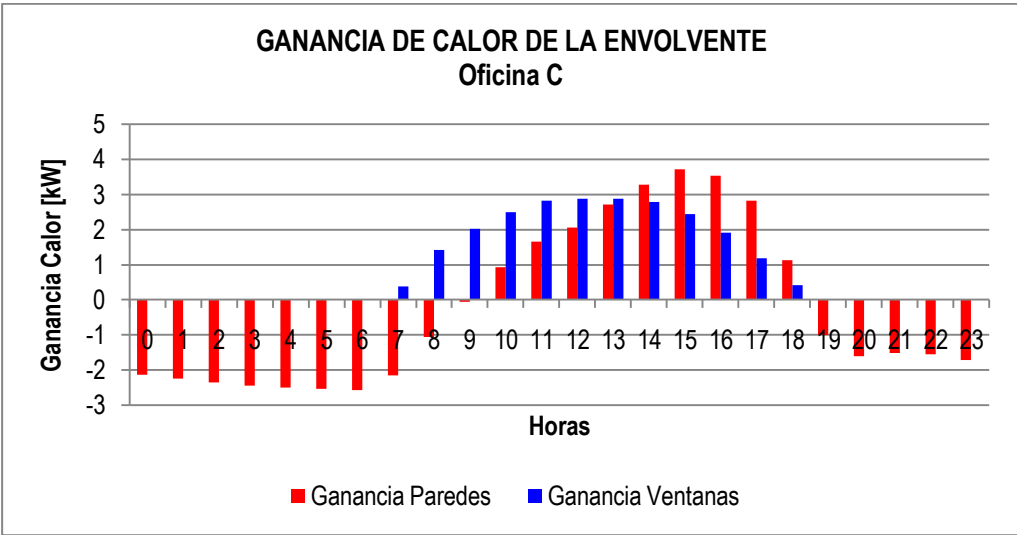
Figura 7-22: Ganancia térmica de la envolvente. Primer piso *lado oeste*, a) Oficina A, b) Oficina B, c) Oficina C, d) Oficina D.



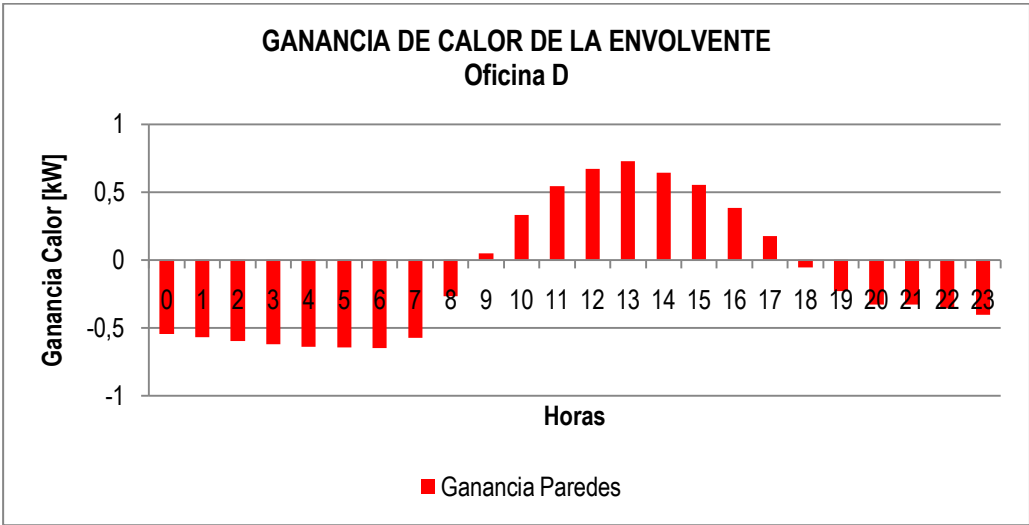
a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7-23: Ganancia térmica de la envolvente. Segundo piso *lado norte*

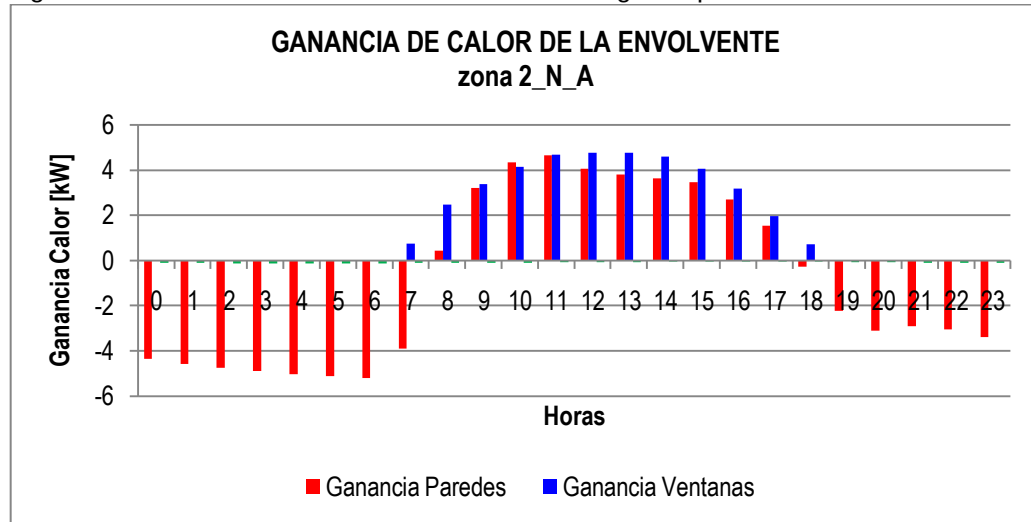
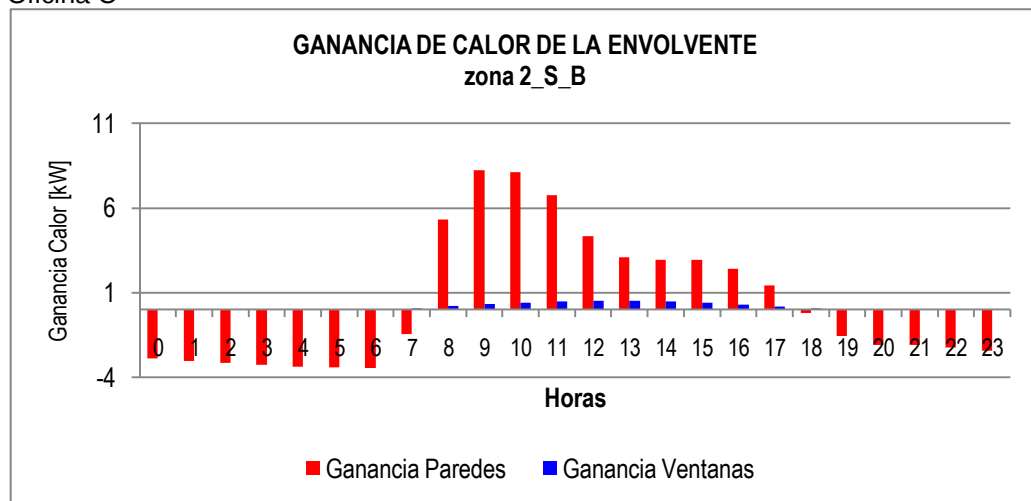
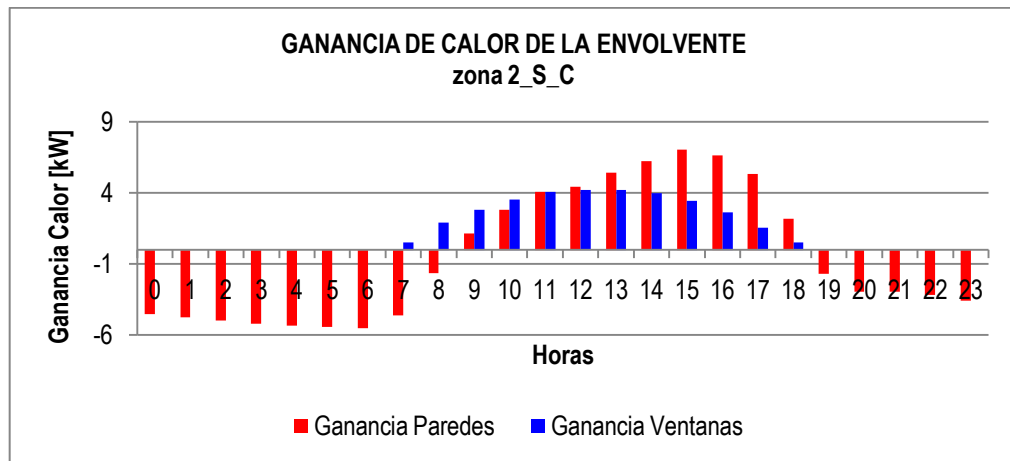


Figura 7-24: Ganancia térmica de la envolvente. Segundo piso *lado sur*, a) Oficina B, b) Oficina C



(a)



(b)

Figura 7-25: Ganancia térmica de la envolvente. Tercer piso.

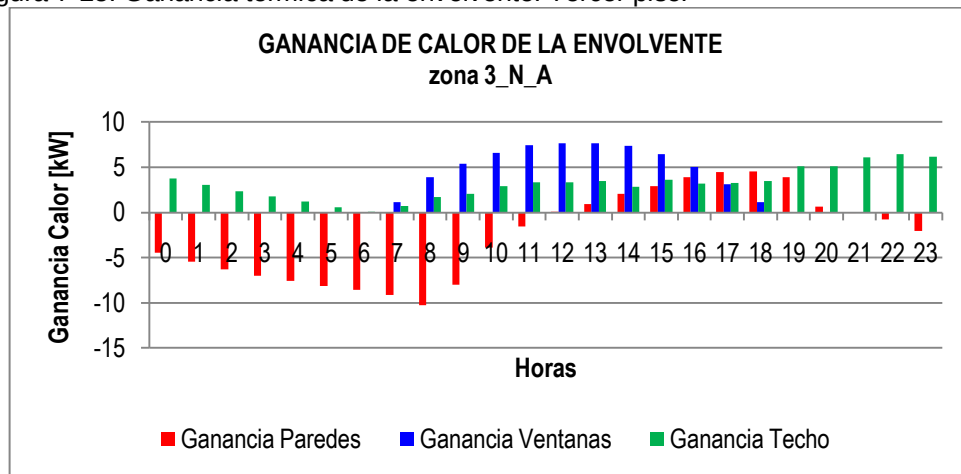
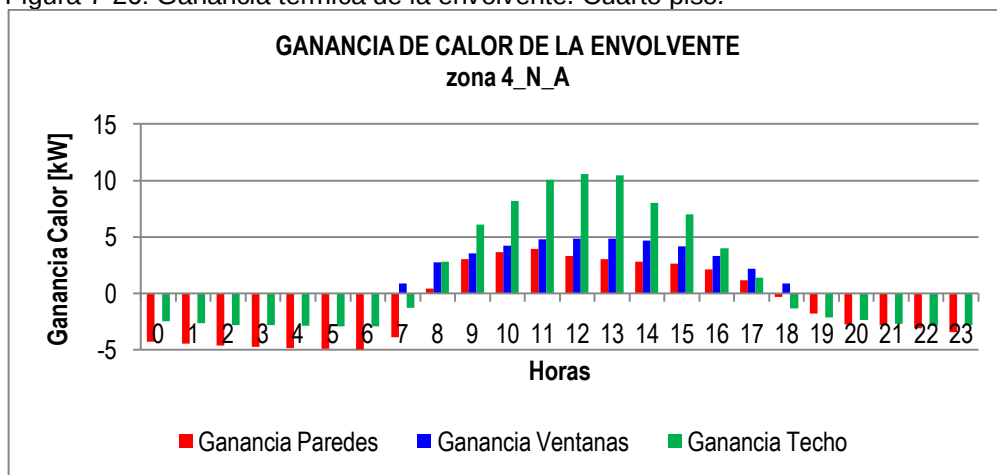


Figura 7-26: Ganancia térmica de la envolvente. Cuarto piso.



Se observa que la ganancia de calor en las fachadas incrementa a partir de las 8 horas hasta las 17 horas, en las ventanas hasta las 18 horas. La ganancia de calor de las ventanas a comparación de las paredes es muy baja debido a están orientadas en las fachadas Norte y Sur. La variación de la carga térmica en las paredes de los pisos depende ampliamente en la ubicación de la zona, figura 7-7, ya que hay unas que no presentan un contacto directo con el Sol, si la zona esta ubicada en el este tiene una ganancia superior en horas de la mañana en comparación a una pared que esta ubicada en sentido oeste y viceversa. En cuanto al techo, la ganancia solar esta concentrada entre las 11 y 13 horas, ya que los rayos del Sol incide de manera directa.

ILUMINACION NATURAL: Alcance de la luz y lux, el análisis se realiza a las 9 horas, para cada uno de los pisos, los resultados se visualizan a través de un esquema con su respectiva tabla.

Figura 7-27: Mapa de la iluminación natural del 1° piso este

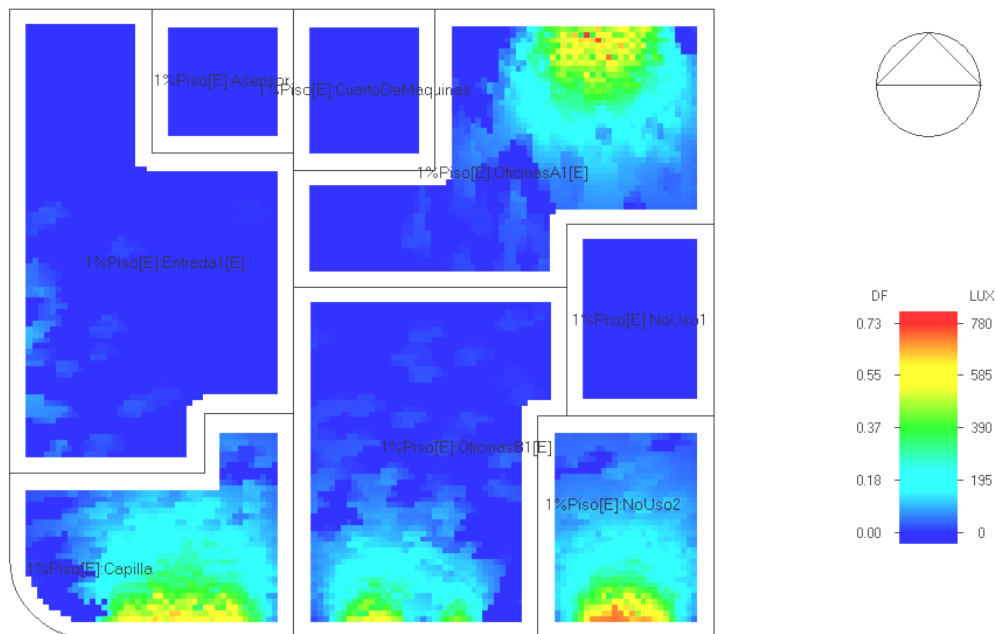


Figura 7-28: Mapa de la iluminación natural del 1° piso oeste

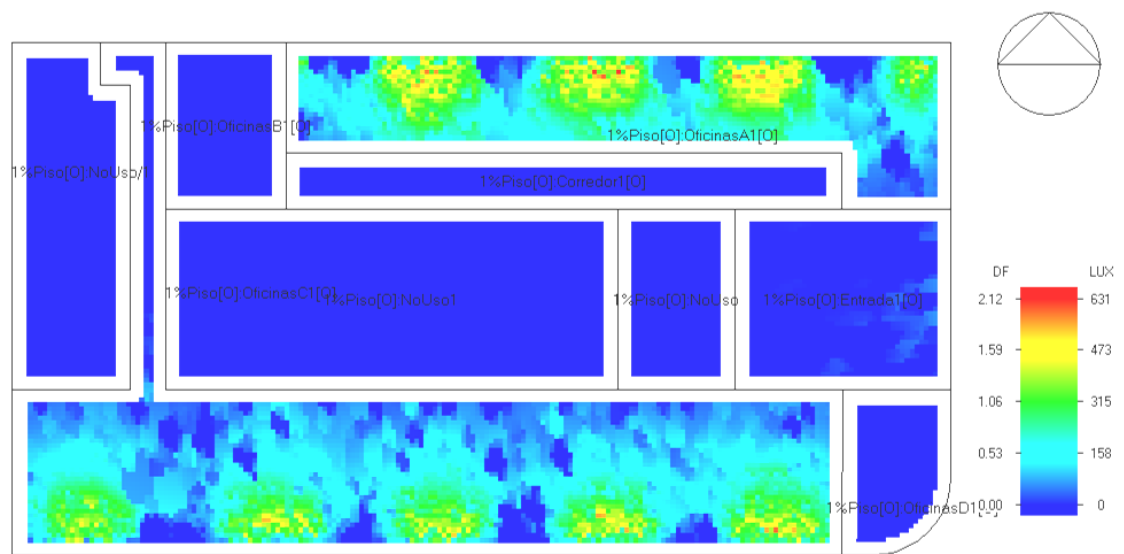


Figura 7-29: Mapa de la iluminación natural del 2º piso

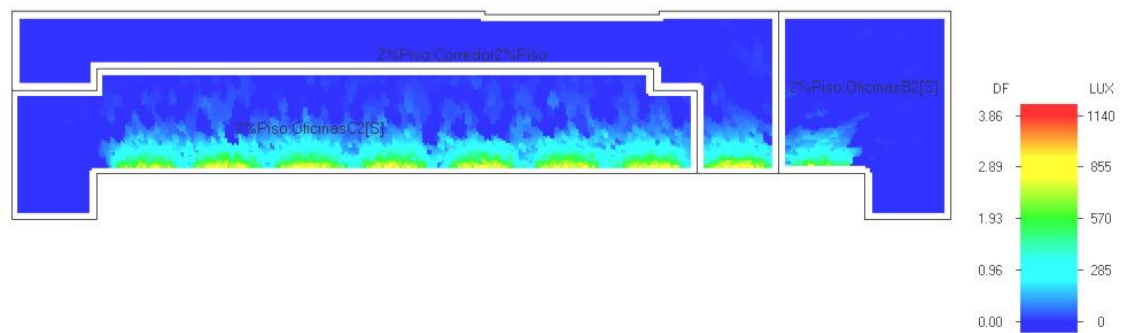


Figura 7-30: Mapa de la iluminación natural del 3º piso

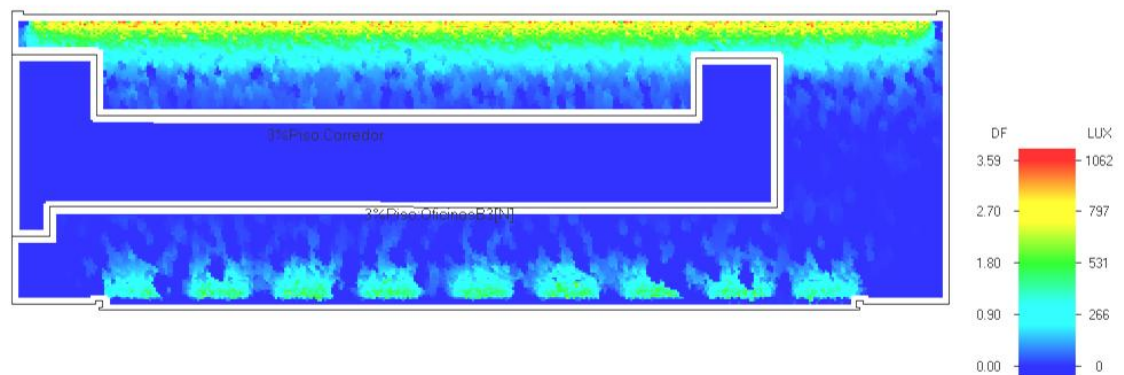
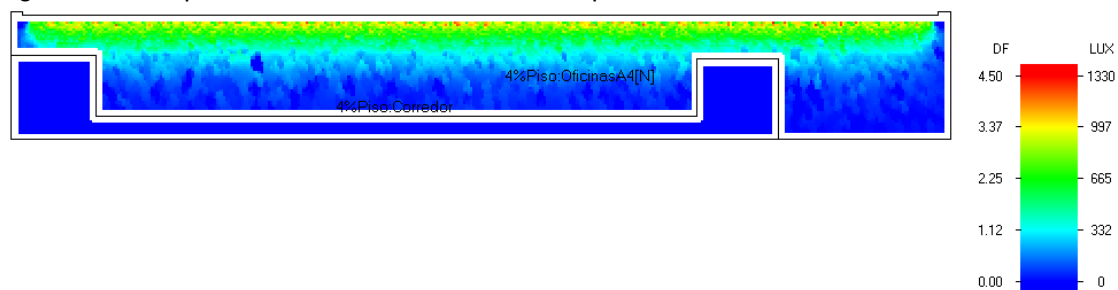


Figura 7-31: Mapa de la iluminación natural del 4º piso



ANÁLISIS: Se observa en la mayoría de las graficas una iluminación en la mayor parte del área aproximadamente igual a cero lux, la iluminación mínima para una oficina es de 400 lux (tabla 3-4). Por tanto se declara que todos los espacios analizados poseen una iluminación escasa.

8. TÉCNICAS PASIVAS

Las técnicas pasivas propuestas en este trabajo, las cuales se simulan a través de E+, son:

- *Técnicas de protección solar y de calor:* Dispositivos de sombra, ventanas fabricadas con varias capas de vidrio, orientación de la edificación.
- *Técnicas de modulación de calor:* Materiales con mayor resistencia al calor.

La *disipación de calor* por medio de la ventilación natural, no se trata en este capítulo debido a la complejidad del tema. La manera de abordarlo es por medio de la dinámica de fluidos computacional, el cual amerita un proyecto de investigación propio.

8.1 OBSERVACIONES AL EDIFICIO 301

Respecto a las técnicas pasivas enumeradas, en relación Edificio 301:

- El edificio en general presenta una correcta orientación respecto al sol, ya que la mayoría del área lateral está en el norte y sur.
- La envolvente del edificio es poco resistente al flujo de calor.
- El edificio tiene poca iluminación
- El edificio presenta una ventilación muy pobre, si bien el edificio por su ventanearía, promueve la entrada de este, no facilita la salida, por tanto no se garantiza la eliminación de calor.
-

8.2 MODULACION DE CALOR

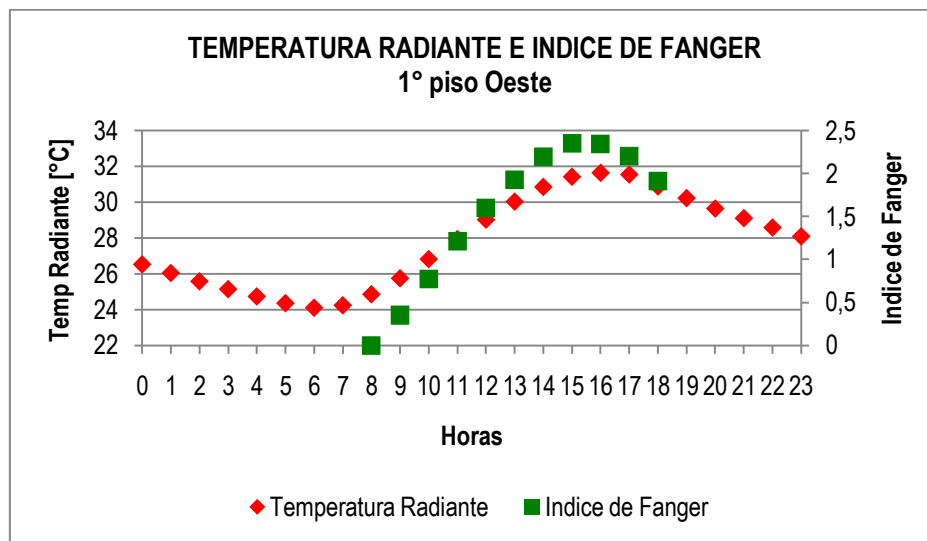
Se propone cambiar la envolvente del edificio, compuesta por: Ladrillo, mortero y estuco, por una de mejor resistencia al calor: Panel yeso, fibra de vidrio. En la tabla 8-1 se ve una mayor resistencia térmica en el modelo pasivo en comparación al modelo original.

Tabla 8-1: Materiales de la envolvente

ORIGINAL	R [m ² *°C/W]	MEJORA	R [m ² *°C/W]
Aire exterior	0.040	Aire exterior	0.040
Ladrillo (100mm)	0.120	Estuco (25mm)	0.037
Estuco (25mm)	0.037	Panel Yeso (13mm)	0.079
Aire interior	0.100	Fibra de vidrio (75mm)	2.100
		Panel Yeso(13mm)	0.079
		Estuco(25mm)	0.037
		Aire Interior	0.100
R_{total}	0.297	R_{total}	1.072

Se simula el nuevo modelo, bajo las mismas condiciones que el modelo original,. La comparación de la efectividad de la pared pasiva se realiza mediante la temperatura radiante y el índice de Fanger.

Figura 8-1: Temperatura radiante, modelo pasivo vs. Original, 1° piso este



Comparando la grafica 8-1 con las graficas 7-10(a) y 7-16(a), pues ambas corresponden a la misma zona de esta grafica. Se puede observar que con las mejoras pasivas, la temperatura radiante bajo un poco, 32°C vs. 31°C al igual que el índice de Fanger 2.6 vs.

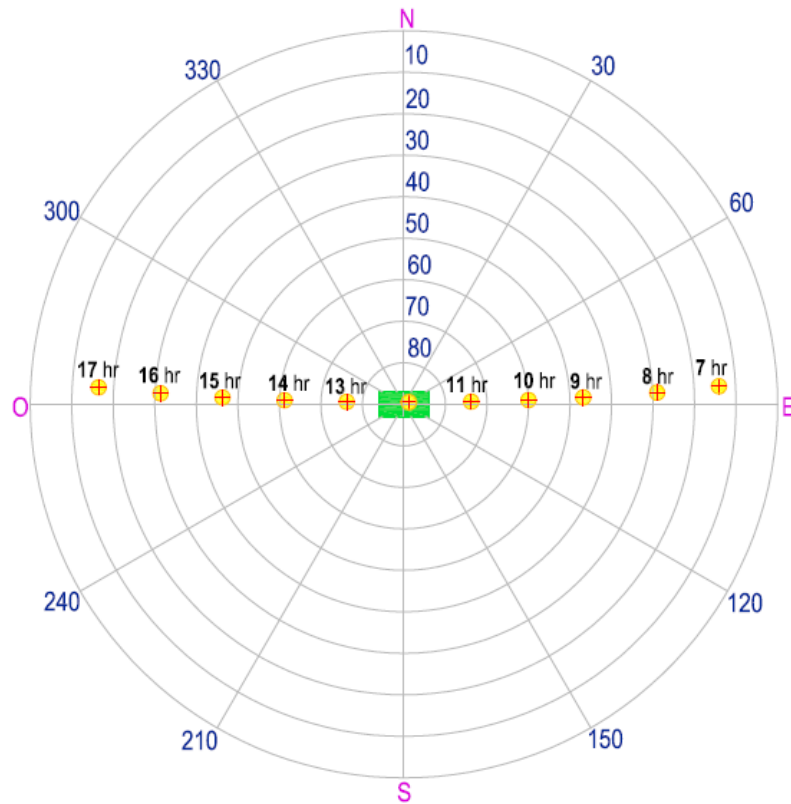
2.3 diferencias inferiores a lo que se esperaba, sin embargo en el perfil de ambas graficas se observa que hubo retardo para llegar a las condiciones inconfortables, por ejemplo a las 9 am de la grafica 7-10(a) la temperatura radiante es de 29.2°C mientras que en la grafica 8-1 esta temperatura es de 26°C, además el Indice de Fanger es inferior a 0.5 mientras que en la grafica 7-16(a) es de 1,24.

8.3 PROTECCION SOLAR

Para este caso se debe tener en cuenta el soleamiento del sitio de interés y cómo repercute este en determinada fachada y fecha, sin embargo, de acuerdo a la explicación en la sección 7.1.2, la fecha en la que se realiza el estudio solar para seleccionar la protección solar es marzo 31 de 2002.

De acuerdo a la tabla 7-2, el mapa estereográfico para la ciudad de Cali en marzo 31 es:

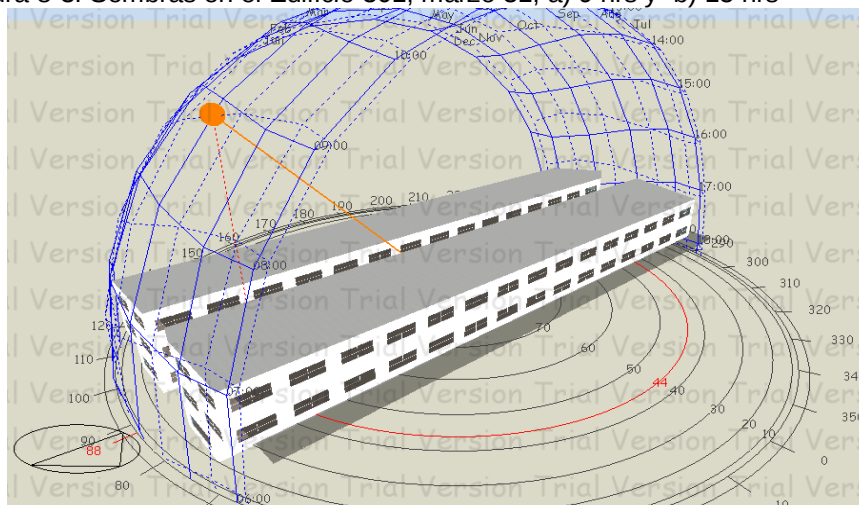
Figura 8-2: Mapa estereográfico, latitud 3.55 N, marzo 31



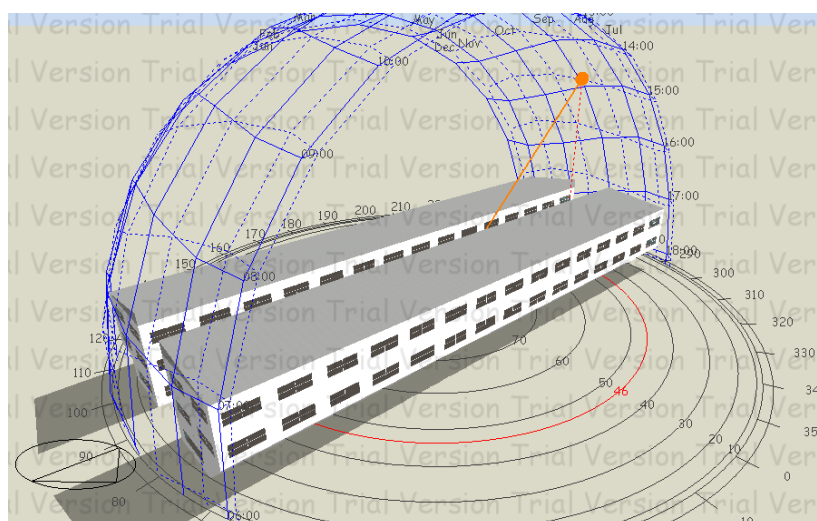
De acuerdo a la figura 8-1 el Sol para este día, da de manera casi directa en las fachadas este y oeste, además incide un poco en las fachadas norte, debido a que el acimut es menor a 90° , en horas de la mañana y, mayor a 270° , en horas de la tarde, por esta razón, los dispositivos de sombra se enfocan sobre estas tres fachadas.

La visualización de la incidencia del Sol a las 9 horas y a las 15 horas, sobre el Edificio 301, es:

Figura 8-3: Sombras en el Edificio 301, marzo 31, a) 9 hrs y b) 15 hrs



(a)



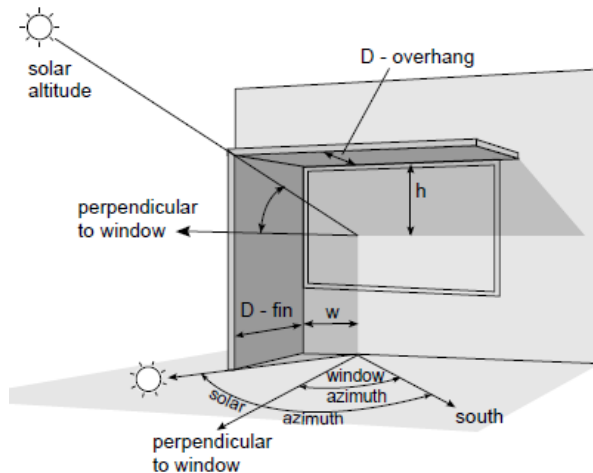
(b)

Para impedir el ingreso del Sol en las fachadas anteriormente citadas, se dan las siguientes soluciones:

1. En las fachadas laterales ubicar voladizos de tal manera que generen sombra en un 100% del área de la ventana.
2. En las fachadas norte ubicar laterales de tal manera que generen sombra en un 100% del área de la ventana

El dimensionamiento de voladizos y laterales se obtiene a partir de las ecuaciones 8-1 y 8-2, respectivamente [16]:

Figura 8-4: Dimensionamiento de voladizo y lateral [16]



$$D_{voladizo} = \frac{h \cdot \cos \gamma}{\tan \beta} \quad \text{Ecuación 8-1}$$

$$D_{laterales} = \frac{w}{\tan \gamma} \quad \text{Ecuación 8-2}$$

Los voladizos y laterales se calculan con el fin de dar sombra a toda la ventana, por tanto, para este caso, el valor h es la altura de la ventana y, w es el ancho de la ventana.

Se analiza la opción de instalar laterales en las ventanas Norte y Sur, ya que los rayos del Sol inciden de manera indirecta sobre ellas, y voladizos en las ventanas ubicadas en las fachadas Este y Oeste, en estas fachadas el Sol incide de manera directa en horas de la mañana y tarde respectivamente.

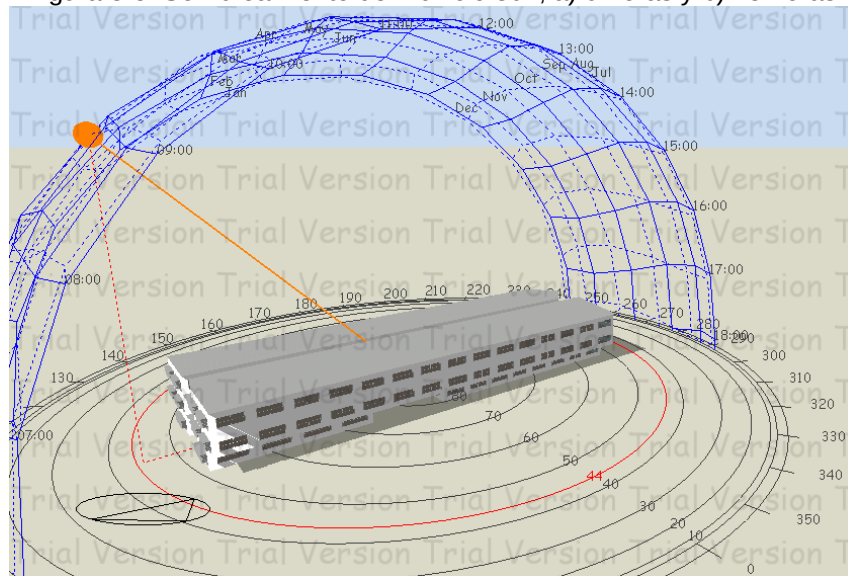
Tabla 8-2: Dimensionamiento de voladizo y laterales

HORA	Altitud solar β	Acimut solar ϕ	ESTE		OESTE		NORTE		VENTANA		VOLADIZOS				LATERAL	VOLADIZO EDIF	
			Acimut de la pared ψ	Acimut solar de la pared γ	Acimut de la pared ψ	Acimut solar de la pared γ	Acimut de la pared ψ	Acimut solar de la pared γ	ALTO h [m]	ANCHO w [m]	ESTE - 1 D [m]	ESTE - 7 D [m]	OESTE - 1 D [m]	OESTE - 7 D [m]	NORTE - 1 D [m]	ALTURA EDIF [m]	D [m]
7	14,01	86,72	90	-3,28	270	-183,28	0	86,72	1,5	3,76	6,00 ¹	0,86 ²	-6,00	-0,86	0,22 ³	10,50	2,41 ⁴
8	28,96	87,35	90	-2,65	270	-182,65	0	87,35	1,5	3,76	2,71	0,39	-2,71	-0,39	0,17	10,50	0,88
9	43,92	87,81	90	-2,19	270	-182,19	0	87,81	1,5	3,76	1,56	0,22	-1,56	-0,22	0,14	10,50	0,42 ⁵
10	58,88	88,06	90	-1,94	270	-181,94	0	88,06	1,5	3,76	0,91	0,13	-0,91	-0,13	0,13	10,50	0,21
11	73,84	87,74	90	-2,26	270	-182,26	0	87,74	1,5	3,76	0,43	0,06	-0,43	-0,06	0,15	10,50	0,12
12	88,72	67,58	90	-22,42	270	-202,42	0	67,58	1,5	3,76	0,03	0,00	-0,03	0,00	1,55	10,50	0,09
13	76,21	272,48	90	182,48	270	2,48	0	272,48	1,5	3,76	-0,37	-0,05	0,37	0,05	-0,16	10,50	0,11
14	61,25	271,92	90	181,92	270	1,92	0	271,92	1,5	3,76	-0,82	-0,12	0,82	0,12	-0,13	10,50	0,19
15	46,29	272,13	90	182,13	270	2,13	0	272,13	1,5	3,76	-1,43	-0,20	1,43	0,20	-0,14	10,50	0,37
16	31,33	272,57	90	182,57	270	2,57	0	272,57	1,5	3,76	-2,46	-0,35	2,46	0,35	-0,17	10,50	0,77
17	16,37	273,17	90	183,17	270	3,17	0	273,17	1,5	3,76	-5,10	-0,73	5,10	0,73	-0,21	10,50	1,98

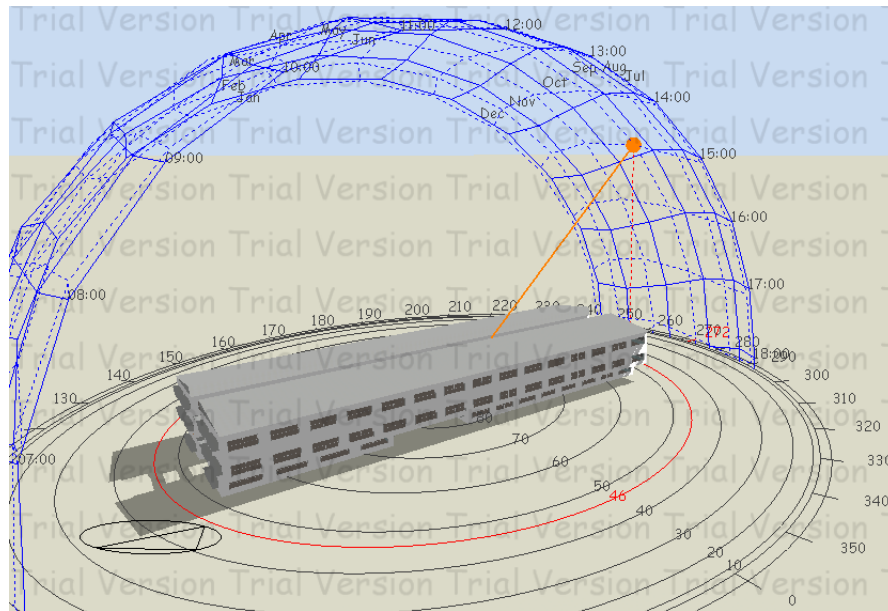
El análisis de esta tabla se realiza a continuación en base a los datos subrayados.

1. La dimensión aconsejada para el voladizo, en las ventanas de las fachadas laterales, es de 6m, al ser esto inapropiado se decide fraccionar este voladizo hasta que de una longitud adecuada.
2. La longitud para el voladizo, anteriormente comentado, es de 0.86m, colocando 7 de ellos en la ventana con una distancia de 0.21 m entre ellos, de esta manera se bloquea la entrada del Sol.
3. La dimensión aconsejada para los laterales es de 0.22, estos se instalan en las fachadas norte del edificio.
4. En las fachadas norte se recomienda instalar un voladizo de 2.41m, sobre el techo, sin embargo sería inapropiado, además la incidencia de los rayos del Sol a las 7 de la mañana no es muy crítico.
5. se decide instalar un voladizo a lo largo de la parte superior de la cara norte del edificio uno de una medida aproximada de 0.42m, correspondiente a las 9 horas, pues se considera que la radiación a esta hora es molesta.

Figura 8-5: Sombreamiento del Edificio 301, a) 9 horas y b) 15 horas



(a)



(b)

Figura 8-6: Sombreamiento con voladizo a) sin voladizo, b) con voladizos, c) incidencia del Sol sin voladizo, d) incidencia del Sol con voladizos



(a)



(b)



(c)



(d)

9. CONCLUSIONES

- Energy plus, es un software que debe tratarse con cuidado para evaluar el confort térmico y estrategias pasivas, debido a la dependencia de los datos de clima a una estación meteorológica. Por tanto la edificación no se puede analizar de acuerdo a la incidencia directa del Sol sobre determinada fachada, **fachada crítica**, sino de acuerdo al día en el que la temperatura de bulbo seco del aire exterior sea la más alta y se mantenga esta tendencia en un lapso determinado de tiempo.
- Cuando se simula en los días de equinoccio o solsticio, se debe tener cuidado en que estas fechas, la temperatura de bulbo seco exterior, sea la apropiada con el clima que causa incomfortabilidad, pues de lo contrario cuando se analice la confortabilidad del lugar el resultado será incongruente con la realidad. Para la solución de este proyecto, por ejemplo, no se pudo simular en equinoccio (marzo 20) debido a que la temperatura de bulbo seco del aire exterior es baja y se mantuvo así durante varias horas, tabla 7-1, infiriendo que en esta fecha se presentaron lluvias.
- Los datos empleados por Energy plus provienen de una estación meteorológica, la cual está ubicada en un aeropuerto y no propiamente del sitio de interés, por esta razón los resultados de la simulación pierden credibilidad, pues muchas veces los aeropuertos están en zonas que tienen condiciones climáticas muy distintas a la ciudad, esto hace que se presenten inconsistencias entre la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa entre ambos sitios. De los datos con los que trabaja este software se rescata los ángulos solares, acimut y altitud solar, los cuales son los mismos sin importar en que punto de la ciudad se encuentra la edificación.
- La importancia de realizar un análisis de confort térmico teniendo en cuenta la fachada crítica se debe a que unas de las variables, por no decir la más importante, es la temperatura radiante, la cual depende de la incidencia de la radiación solar sobre la pared, además de la resistencia que ella posea al calor. Cuando se pasa por alto cual es la fachada más afectada por los rayos del Sol se cae en el error de adoptar

soluciones pasivas, por ejemplo elementos de sombra, en lugares que no son los óptimos o con unas dimensiones inadecuadas. También se puede llegar a instalar un equipo de aire acondicionado con la potencia incorrecta.

- Una manera adicional para bajar la T_{rad} es instalando en la pared interna interna un material de baja emisividad, por ejemplo aluminio, sin embargo E+ no tiene presente la emisividad a la hora de calcular la T_{rad} .
- No se tuvo en cuenta la ventilación natural debido a la configuración del edificio, pues no permite el flujo cruzado. Por tanto la manera en la que se debe bajar la T_{in} es con la ayuda de ventilación mecánica.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] NUCETE ALVAREZ, Evangelina. Mantenerse frescos sin calentar el planeta. Madrid: WWF/Adena, 2006, 31 p
- [2] SANTAMOURIS, Matheos. Passive cooling of buildings. London: James & James, 2005, 57 p.
- [3] SOTO, Jesús. El método de Fanger. Norma UNE-ISO 7730. Madrid: S.LOW ENERGY, 2008, 17 p.
- [4] NILSSON Håkan. Tools-Macro-Security-Mean. Gävle: University of Gävle.
- [5] University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratory. Sun Path Chart Program. 2007. <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>.
- [6] ASHRAE. Cooling and Heating Loads Calculations Manual, Chapter 31. Atlanta: ASHRAE, 2005. 69 p
- [7] McQUISTON, Faye, PARKER Jerald. Calefacción, ventilación y aire acondicionado. México D.F: Limusa Wiley, 2010, 600 p.
- [8] CENGEL, Yunus. Heat Transfer. New York: McGraw Hill, 2003.
- [9] MAGER, Jeanne. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2001, 42 p.
- [10] Google maps. maps.google.es/
- [11] GAMBOA Johny, ROSILLO Miguel, HERRERA Carlos, IGLESIAS Verónica. Confort Ambiental en VIS en Cali. Cali: Universidad del Valle, 2011, 108 p.

- [12] CENICAÑA. http://www.cenicana.org/clima_/mapas_rma.php.
- [13] GONZALEZ, Humberto, RODRIGUEZ, Fabio. Manual de radiación solar en Colombia. Bogotá, 1992, 71 p.
- [14] <http://www.extech.com/instruments/product.asp?catid=66&prodid=414>.
- [15] <http://www.tsi.com/velocicalc-rotating-vane-anemometer-5725/>.
- [16] <http://windows.lbl.gov/daylighting/designguide/section5.pdf>
- [17] GIVONI Baruch. Indoor temperature reduction by passive cooling systems. s.l. : Solar Energy, 2011. págs. 1692–1726. 85.
- [18] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, Unidad de Planeacion Minero Energético. Atlas de radiación solar de Colombia. Bogotá: IDEAM, 2005.
- [19] STRAHLER, Arthur. Physical Geography. New York: John Wiley & Sons, 2006, 728 p.

ANEXO A. GANANCIA DE CALOR DE ACUERDO AL NIVEL DE ACTIVIDAD DE LOS OCUPANTES

Degree of activity	Typical application	Total heat, W*		Sensible heat, W*	Latent heat, W*
		Adult male	Adjusted M/F/C ¹		
Seated at theater	Theater—matinee	115	95	65	30
Seated at theater, night	Theater—evening	115	105	70	35
Seated, very light work	Offices, hotels, apartments	130	115	70	45
Moderately active office work	Offices, hotels, apartments	140	130	75	55
Standing, light work; walking	Department or retail store	160	130	75	55
Walking, standing	Drug store, bank	160	145	75	70
Sedentary work	Restaurant ²	145	160	80	80
Light bench work	Factory	235	220	80	80
Moderate dancing	Dance hall	265	250	90	90
Walking 4.8 km/h (3 mph); light machine work	Factory	295	295	110	110
Bowling ³	Bowling alley	440	425	170	255
Heavy work	Factory	440	425	170	255
Heavy machine work; lifting	Factory	470	470	185	285
Athletics	Gymnasium	585	525	210	315

Note: Tabulated values are based on a room temperature of 24°C (75°F). For a room temperature of 27°C (80°F), the total heat gain remains the same but the sensible heat values should be decreased by about 20 percent, and the latent heat values should be increased accordingly. All values are rounded to nearest 5 W. The fraction of sensible heat that is radiant ranges from 54 to 60 percent in calm air ($V < 0.2$ m/s) and from 19 to 38 percent in moving air ($0.2 < V < 4$ m/s).

*Multiply by 3.412 to convert to Btu/h.

¹Adjusted heat gain is based on normal percentage of men, women, and children for the application listed, with the postulate that the gain from an adult female is 85 percent of that for an adult male and that the gain from a child is 75 percent of that for an adult male.

²Adjusted heat gain includes 18 W (60 Btu/h) for food per individual (9 W sensible and 9 W latent).

³Figure one person per alley actually bowling, and all others are sitting (117 W) or standing or walking slowly (231 W).

Fuente: Y. Cengel, *Heat Transfer*. Second Edition. New York McGraw Hill, 2003

ANEXO B. EFICIENCIA DE LOS DISTINTOS TIPOS DE ILUMINACION

Type of lighting	Efficacy, lumens/W	Life, h	Comments
Combustion			
Candle	0.2	10	Very inefficient. Best for emergencies.
Incandescent			
Ordinary	5–20	1000	Low initial cost; low efficiency.
Halogen	15–25	2000	Better efficiency; excellent color rendition.
Fluorescent			
Ordinary	40–60	10,000	Being replaced by high-output types.
High output	70–90	10,000	Commonly in offices and plants.
Compact	50–80	10,000	Fits into the sockets of incandescent lights.
Metal halide	55–125		High efficiency; good color rendition.
Gaseous Discharge			
Mercury vapor	50–60	10,000	Both indoor and outdoor use.
High-pressure sodium	100–150	15,000	Good color rendition. Indoor and outdoor use.
Low-pressure sodium	up to 200		Distinct yellow light. Best for outdoor use.

Fuente: Y. Cengel, *Heat Transfer*. Second Edition. New York McGraw Hill, 2003