



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA - DISEÑO BIOCLIMÁTICO

SIMULACIÓN DE LA ILUMINACIÓN NATURAL Y EL DESEMPEÑO
TÉRMICO DE UN ESPACIO CON UN TUBO SOLAR

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VERUSHKA GÓMEZ DICKINSON

TUTOR PRINCIPAL:
DR. GUILLERMO BARRIOS DEL VALLE, IER-UNAM

COMITÉ TUTOR:
DRA. GUADALUPE HUELSZ LESBROS, IER-UNAM
DR. JORGE ANTONIO ROJAS MENÉNDEZ, IER-UNAM
M. EN A. CECILIA G. GUADARRAMA GÁNDARA, FAC. ARQ.-UNAM
DR. PABLO DAVID ELÍAS LÓPEZ, UAM-AZCAPOTZALCO

TEMIXCO, MOR. ENERO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros

Secretario: Dr. Guillermo Barrios del Valle

Vocal: Dr. Jorge Antonio Rojas Menéndez

1^{er}. suplente: M. en A. Cecilia G. Guadarrama Gándara

2^{do}. suplente: Dr. Pablo David Elías López

IER-UNAM, Temixco, Mor., México - Enero 2017

TUTOR DE TESIS:

Dr. Guillermo Barrios del Valle

FIRMA

Dedicatoria

A Verush, mi niña interior y mi ser superior,
con inmensa gratitud por todo el aprendizaje,
crecimiento, transición y constante evolución.

A Mamá, mi guerrera incansable, mi luz,
quien me ha dado absolutamente todo y más.

A Yeye, mi persona favorita y ejemplo a seguir...
quien a sus 90 años seguía con la mejor actitud,
sonriendo a la vida y dándome lo mejor de ella.

Agradecimientos

A cada uno de los miembros de mi comité tutorial: Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros, Dr. Guillermo Barrios del Valle, Dr. Jorge Antonio Rojas Menéndez, M. en A. Cecilia G. Guadarrama Gándara, y Dr. Pablo David Elías López por todo su apoyo, comentarios, enseñanzas, aportaciones y revisiones que hicieron posible la realización de esta tesis.

Al instituto de Energías Renovables y la la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme la realización de los estudios de maestría. Gracias al personal docente, administrativo, amigos y compañeros, por todo el apoyo recibido durante mi estancia en el IER.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para la realización de los estudios de maestría.

A mi tutor, Dr. Guillermo Barrios, por todas y cada una de tus enseñanzas, por el trabajo realizado de forma conjunta, además del tiempo, paciencia, apoyo y asesoría a lo largo del este proceso.

A Mamá por absolutamente todo, por tu amor y tu presencia incondicional, por respaldar y apoyar cada una de mis decisiones, de mis ideales y de mis sueños, por ser mi mejor cómplice en este proyecto y por caminar a mi lado paso a paso dándome siempre el soporte necesario para salir adelante.

A mi amado "Clan Pata de Perro", por su apoyo y amor incondicional, por ser uno de los pilares más importantes de mi vida, junto con los nuevos miembros que aún a su corta edad son una de mis inspiraciones y motor de vida, por estar siempre presentes en cada momento y por enseñarme el valor de la Familia.

A todos y cada uno de mis AMIGOS que son mi Familia, por ¡ser, estar y existir! por cada aventura, cada momento compartido y por su cariño incondicional, aún a miles de kilómetros de distancia; por todo su tiempo, paciencia y apoyo a lo largo de este proceso, por creer en mi y por enseñarme el valor de la amistad.

A todos los que me ayudaron y me transmitieron su conocimiento a lo largo del proceso para presentar el examen de admisión a la maestría, gracias por su tiempo y paciencia.

A mis amigos de generación por hacer de mi estadía en el IER una de las más divertidas y por permitirme aprender de cada uno de ustedes.

A mi "Equipo" EnergicIER, por todos los partidos y los momentos memorables dentro y fuera de la cancha, por tanto cariño y por formar parte de esta aventura.

A Dany por tu tiempo y apoyo a lo largo de este proceso, principalmente durante las mediciones, por todos y cada uno de los momentos vividos y compartidos y sin duda por tu amistad.

A mis profesores y amigos del Posgrado en Ingeniería en CU, por sus importantes y valiosas enseñanzas que sin duda forman parte de mi desarrollo actual, por esa pasión que me inspira, por ser una guía, por su confianza, su tiempo, paciencia y dedicación, por todos los momentos compartidos y principalmente por su amistad.

Contenido

Resumen	XVII
1. Introducción	1
2. Iluminación	11
2.1. Iluminación	12
2.2. Sistemas y estrategias de iluminación en climas cálidos.	17
2.3. Confort lumínico y térmico.	23
2.4. Parámetros de evaluación	26
2.5. Metodología para la evaluación del desempeño lumínico y térmico	33
3. Validación del uso de OpenStudio	35
3.1. Caso uno	35
3.2. Caso dos	40
3.3. Conclusiones	50
4. Evaluación de la iluminación natural y el desempeño térmico	53
4.1. Antecedentes	54
4.2. Casos de estudio	60
4.3. Simulaciones	66
5. Conclusiones	109
5.1. Propuesta de solución	114
5.2. Recomendaciones para futuros estudios	114

Lista de Figuras

2.1. Espectro electromagnético, es una gama continua de ondas que va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Los nombres descriptivos de las diferentes secciones no son más que una clasificación histórica, ya que todas estas ondas son de la misma naturaleza y difieren principalmente en cuanto a frecuencia y longitud de onda; todas tienen la misma rapidez [41].	14
2.2. Curva de sensibilidad del ojo humano.	15
2.3. Componentes de iluminación natural. Componentes de conducción y componentes de paso [48].	20
2.4. Conductor de sol [48].	21
2.5. Diagrama de evaluación para el confort lumínico y el desempeño térmico utilizando el Factor de Decremento (FD), Frecuencia de Confort Visual (FVC), Zona 1: baja frecuencia de confort visual y un bajo factor de decremento; Zona 2: baja frecuencia de confort visual y un alto factor de decremento; Zona 3: alta frecuencia de confort visual y un bajo factor de decremento; Zona 4: alta frecuencia de confort visual y un alto factor de decremento.	34
3.1. Esquema y dimensiones del espacio simulado en el caso uno (a) representación digital del espacio usado por Christian <i>et al.</i> [29], (b) representación digital del espacio en SketchUp con la conexión para OpenStudio.	36

3.2. Comparación entre la iluminancia reportada por Christian <i>et al.</i> [29] para el día 12 de septiembre (265 juliano) a las 15:00 del año 2008, y la simulada usando OpenStudio para el 12 de septiembre (día 265 juliano) a las 15:00 horas de un año típico de Dinamarca a lo largo de una línea central sobre la superficie de un espacio.	37
3.3. Gráfica Estereográfica correspondiente a Dinamarca. Coordenadas 55°40'34"N 12°34'08"E.	39
3.4. Iluminancia lo largo de una línea central sobre la superficie de un espacio, durante once días diferentes, +/- 5 días a partir del 12 de septiembre (día 265 juliano) a las 14:00 horas de un año típico de Dinamarca, utilizando el archivo de clima descargado del sitio web de EnergyPlus [58].	40
3.5. Comparación entre la iluminancia reportada por Christian <i>et al.</i> [29] para el día 21 de septiembre (265 juliano) a las 15:00 del año 2008, y la simulada en OpenStudio para el 16 de septiembre (día 260 juliano) a las 14:00 horas de un año típico de Dinamarca, 2009.	41
3.6. Equipo para realizar las mediciones experimentales de los niveles de iluminación en la superficie exterior de un tubo solar.	42
3.7. Gráfica Estereográfica correspondiente a Temixco Morelos, México. Coordenadas 18°51'16"N 99°13'38"O	43
3.8. Registro fotográfico del sombreado en la azotea de la oficina de dirección en el IER-UNAM cada hora para el día 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015.	44
3.9. Dimensiones de la oficina de dirección del IER-UNAM. Cotas en metros.	45
3.10. Representación digital del espacio en SketchUp de acuerdo a las dimensiones de la oficina de dirección del IER-UNAM con tubo solar en la azotea.	45
3.11. Comparación a las 11:00 horas del día 27 de mayo del 2015, del sombreado entre el modelo simulado y el registro fotográfico de la azotea de la oficina de dirección en el IER-UNAM.	46

3.12. Niveles de iluminación medidos y simulados sobre la cubierta de la oficina de dirección del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015 sin tomar en cuenta el árbol.	47
3.13. Error relativo de la comparación de los niveles de iluminación medidos y simulados en un punto sobre el tubo solar instalado en la cubierta de la oficina de dirección del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015, de las 7:00 a las 19:00 horas sin tomar en cuenta el árbol. . .	48
3.14. Representación digital del espacio en SketchUp de acuerdo a las dimensiones de la oficina de dirección del IER-UNAM con tubo solar en la cubierta, considerando el árbol existente frente a la fachada sur.	49
3.15. Niveles de iluminación medidos y simulados en un punto sobre el tubo solar instalado en la cubierta de la oficina de dirección del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015. Resultados de la simulación del modelo sin árbol y el modelo con árbol.	50
3.16. Error relativo de la comparación de los niveles de iluminación medidos y simulados sobre un tubo solar instalado en la cubierta de la oficina de dirección del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015. Simulación sin árbol y con árbol.	51
4.1. Planta de la oficina de la dirección del IER-UNAM, donde TS es la proyección de la ubicación del tubo solar en la cubierta, MF-S es muro fachada sur, MF-N es muro fachada norte, MC-E muro interior este, y MI-O es muro interior oeste, AT es el área de trabajo. C-01 indica proyección de Corte y F-01 proyección de fachada. Las cotas están en metros. . .	55
4.2. Corte (C-01) de la oficina de la dirección del IER-UNAM, donde TS es el tubo solar en la cubierta, V es ventana, MF-S es muro fachada sur, MF-N es muro fachada norte, C-Inc es cubierta inclinada, y P-Int es piso interior. Las cotas están en metros.	56

4.3. Fachada (F-01) de la oficina de la dirección del IER-UNAM, donde TS es el tubo solar en la cubierta, V es ventana, MF-S es muro fachada sur, y C-Inc es cubierta inclinada. Las cotas están en metros.	57
4.4. Tubo solar (TS) instalado en la cubierta de la oficina de la dirección del IER-UNAM.	57
4.5. Marcas en forma de cruz al interior de la oficina de la dirección del IER-UNAM, debido al tubo solar instalado en la cubierta.	58
4.6. Medición de la iluminancia en marcas con mayor incidencia y en diversos puntos circundantes a partir un centro generado por la cruz.	58
4.7. Niveles de iluminación al interior de la oficina de la dirección del IER-UNAM a las 13:00 h en diversos puntos de la circunferencia, en donde TS es la proyección del la ubicación del tubo solar en la cubierta, $mf c$ es la marca en forma de cruz, r es el radio de la circunferencia, y c es la circunferencia. La iluminancia en los puntos de medición es $A = 743 lx$, $B = 1466 lx$, $C = 97 lx$, $D = 1223 lx$, $E = 178 lx$	59
4.8. Esquema del bloque hueco de la cubierta de altura $E = 2e_{11} + e_{21}$, y largo $A = 2a_{11} + 2a_{12} + 3a_{21}$, con $e_{11} = 0.025 m$, $e_{21} = 0.15 m$, $a_{11} = 0.045 m$, $a_{12} = 0.025 m$ y $a_{21} = 0.14 m$	61
4.9. Modelo en SketchUp para la simulación del CEEA.	64
4.10. Modelo en SketchUp para la simulación del CESTS.	64
4.11. Modelo en SketchUp para la simulación del CECED.	65
4.12. Modelo en SketchUp para la simulación del CECETS.	66
4.13. Mapas de iluminancia para el CEEA por cada mes (enero - diciembre) a lo largo del año a las 12:00 horas. Días julianos: 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, 355, correspondientes cada día a un mes del año.	68
4.14. Mapas de iluminancia durante cada hora para el CEEA para el día 209 juliano.	69
4.15. Mapas de iluminancia para el CESTS por cada mes (enero - diciembre) a lo largo del año a las 12:00 horas. Días julianos: 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, 355, correspondientes cada día a un mes del año.	70
4.16. Mapas de iluminancia durante cada hora para el CESTS para el día 209 juliano.	71

4.17. Mapas de iluminancia para el CECD por cada mes (enero - diciembre) a lo largo del año a las 12:00 horas. Días julianos: 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, 355, correspondientes cada día a un mes del año.	73
4.18. Mapas de iluminancia durante cada hora para el CECD para el día 209 juliano.	74
4.19. Mapas de iluminancia para el CECETS por cada mes (enero - diciembre) a lo largo del año a las 12:00 horas. Días julianos: 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, 355, correspondientes cada día a un mes del año.	75
4.20. Mapas de iluminancia durante cada hora para el CECETS para el día 209 juliano.	76
4.21. UDI_- para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.	80
4.22. UDI_u para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.	81
4.23. UDI_+ para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.	82
4.24. UDI_- para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.	83
4.25. UDI_u para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.	84
4.26. UDI_+ para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.	85

4.27. Evaluación del desempeño lumínico y térmico al interior del caso de estudio por cada mes a lo largo del año. Para la <i>FCV</i> con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, para los (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.	86
4.28. Evaluación del desempeño lumínico y térmico al interior del caso de estudio promedio anual. Para la <i>FCV</i> con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, para el CEEA, CESTS, CECD y CECETS.	89
4.29. Evaluación del desempeño lumínico y térmico sobre el área de trabajo (AT) del caso de estudio por cada mes a lo largo del año. Para la <i>FCV</i> con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.	91
4.30. Evaluación del desempeño lumínico y térmico sobre el área de trabajo (AT) del caso de estudio promedio anual. Para la <i>FCV</i> con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, para los casos CEEA, CESTS, CECD y CECETS.	95
4.31. Evaluación del desempeño lumínico y térmico al interior del caso de estudio por cada mes a lo largo del año. Para la <i>FVC</i> , con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.	97
4.32. Evaluación del desempeño lumínico y térmico al interior del caso de estudio promedio anual. Para la <i>FCV</i> , con un rango de $E_{UL} = 300 lx$ y $E_{LL} = 1500 lx$ para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.	100
4.33. Evaluación del desempeño lumínico y térmico sobre el área de trabajo (AT) del caso de estudio por cada mes a lo largo del año. Para la <i>FCV</i> , con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.	102
4.34. Evaluación del desempeño lumínico y térmico sobre el área de trabajo (AT) del caso de estudio promedio anual. Para la <i>FCV</i> con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD y (d) CECETS.	106

Lista de Tablas

2.1. Niveles de iluminación en los centros de trabajo, Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008. Niveles Mínimos de Iluminación (L_{min}) [8].	24
2.2. Valores límite de iluminancia en UDI para los límites inferiores de iluminancia E_{LL} , y los límites superiores de iluminancia E_{UL} de acuerdo a varios autores.	31
3.1. Parámetros de simulación usados por Christian <i>et al.</i> [29]	38
4.1. Sistemas constructivos de muro (SCM), de muro interior (SCMI), de piso (SCP) y de cubierta (SCC), de la oficina de la dirección del IER-UNAM. El orden de los materiales que conforman cada sistema constructivo, se describe de exterior a interior.	62
4.2. Propiedades térmicas de los materiales, conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (c).	62
4.3. Valores de absortancia solar y acabados utilizados en las simulaciones.	63
4.4. Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), de los casos CEEA, y CESTS.	87

4.5. Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), de los casos CECD y CECETS.	87
4.6. Diferencia de los porcentajes promedio entre el CEEA y cada caso de estudio (CE). Casos CESTS, CECD y CECETS por mes para el FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, al interior de la oficina de la dirección del IER-UNAM.	88
4.7. Datos de los porcentajes promedio por año del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), de los casos CEEA, CESTS, CECD, y CECETS.	90
4.8. Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}) en el área de trabajo (AT) para los casos CEEA, y CESTS.	92
4.9. Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), en el área de trabajo (AT) para los casos CECD, y CECETS.	93
4.10. Diferencia de los porcentajes promedio entre el CEEA y cada caso de estudio (CE). Casos CESTS, CECD y CECETS por mes para el FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, en el área de trabajo (AT).	94
4.11. Datos de los porcentajes promedios por año del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$ junto con su desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), en el área de trabajo para los casos CEEA, CESTS, CECD, y CECETS.	96
4.12. Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con su desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), de los casos CEEA, y CESTS.	98
4.13. Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con su desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}) de los casos CECD, y CECETS.	98

4.14. Diferencia de los porcentajes promedio entre el CEEA y cada caso de estudio (CE). Casos CESTS, CECD y CECETS por mes para el FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$, al interior de la oficina de la dirección del IER-UNAM. 99

4.15. Datos de los porcentajes promedio por año del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} , y σ_{FCV}), de los casos CEEA, CESTS, CECD, y CECETS. 101

4.16. Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con la desviación estándar correspondiente a (σ_{FD} , y σ_{FCV}) en el área de trabajo (AT) para los casos CEEA, y CESTS. . . 103

4.17. Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), en el área de trabajo (AT) para los casos CECD, y CECETS. . 104

4.18. Diferencia de los porcentajes promedio entre el CEEA y cada caso de estudio (CE). Casos CESTS, CECD y CECETS por mes para el FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$, en el área de trabajo (AT). 105

4.19. Datos de los porcentajes promedio por año del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), en el área de trabajo (AT) para cada caso CEEA, CESTS, CECD, y CECETS. 107

Resumen

Esta tesis presenta un estudio de la iluminación natural y el desempeño térmico de un espacio existente del Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM), el cual está asignado a la oficina de dirección, y en donde se encuentra instalado un tubo solar en la cubierta. Se utiliza OpenStudio como interfaz de Radiance y EnergyPlus, programas con los que se realizan las simulaciones. Para corroborar el uso de OpenStudio, se realiza una comparación cualitativa para dos casos, el primero, compara los resultados de una simulación reportada previamente en la literatura, la cual evalúa el nivel de iluminación a lo largo de una línea central sobre la superficie de un espacio; y los resultados de generar una simulación equivalente a la reportada en la literatura, a partir de la representación digital del espacio conforme a las características y parámetros reportados. El segundo, compara los resultados de mediciones experimentales, las cuales evalúan el nivel de iluminación en un punto fijo de un espacio existente a lo largo de 12 horas; y los resultados de generar una simulación equivalente a partir de la representación digital del espacio conforme a las características y parámetros físicos existentes. Se representa digitalmente el espacio de la oficina de dirección del IER-UNAM a partir de las características físicas existentes y se denomina "caso de estudio estado actual" (CEEA). Se realizan tres propuestas de caso de estudio a partir de supuestas variaciones físicas representadas digitalmente con el objetivo de comparar y evaluar las condiciones de iluminación y el desempeño térmico entre los casos. La primera propuesta de variación implica la representación digital de la oficina de dirección del IER-UNAM sin la presencia del tubo solar en la cubierta, y se denomina "caso de estudio sin tubo solar" (CESTS); la segunda propuesta de variación consiste en sustituir digitalmente el vidrio asignado al tubo solar, por un vidrio difuso, con

la finalidad de convertir el 100 % de la radiación solar transmitida en luz difusa, y se denomina "caso de estudio cristal difuso" (CECD); y la tercera propuesta de variación implica sustituir digitalmente el vidrio asignado al tubo solar, por un vidrio difuso, y generar una extensión del tubo solar en el exterior, con la finalidad de evitar el sombreado existente por los árboles vecinos y los elementos de colindancia, y se denomina "caso de estudio con extensión de tubo solar" (CECETS). Para todas las simulaciones se utilizó un archivo de clima conforme un año típico de Temixco, Morelos. De cada uno de los casos de estudio se delimitan dos superficies para su evaluación, la primera que considera el área total de la oficina de dirección y la segunda que considera el área de trabajo (escritorio). Para evaluar las simulaciones, en esta tesis se utiliza el parámetro reportado en la literatura como *Useful Daylight Illuminance*, *UDI*, por sus siglas en inglés, (Iluminancia Útil por Luz Natural), siendo (UDI_-) subiluminación, (UDI_u) iluminación adecuada, y (UDI_+) sobreiluminación; con rangos de evaluación sugeridos en la literatura y rangos propuestos en esta tesis. Esta tesis plantea el uso de una metodología que combina el parámetro de Factor de Decremento (*FD*) y el de Frecuencia de Confort Visual (*FCV*) para generar un diagrama con cuatro zonas, con el objetivo de ayudar a la evaluación de estrategias de los niveles de iluminación y el desempeño térmico. De acuerdo a las comparaciones de los resultados de los cuatro casos de estudio y la superficie delimitada, se concluye que las condiciones del CEEA no son las adecuadas debido a la ubicación del tubo solar, altura al interior del espacio, material del difusor del tubo solar, y fundamentalmente por la presencia de un contraste entre los niveles de iluminación generados por la radiación solar incidente a través del tubo solar y los niveles de iluminación generados por la radiación solar incidente a través de la ventana. Las variaciones en las condiciones y materiales del difusor generan mejoras mínimas en el desempeño térmico y lumínico.

Capítulo 1

Introducción

El sector energético representa un papel fundamental en la contribución al desarrollo de la economía de las regiones. De acuerdo con el *United Nations Environment Programme* (UNEP) [1] y la *United States Environmental Protection Agency* (EPA) [2], las edificaciones utilizan alrededor del 40 % de la energía mundial, y generan aproximadamente una tercera parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial. Las edificaciones residenciales y comerciales consumen aproximadamente un 60 % de la electricidad a nivel mundial [1].

De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2014 [3], del consumo total mundial de energía, 384,050 Petajoule (*PJ*), el sector residencial es el tercer consumidor, representa el 23.2 %, lo anteceden el transporte con un 27.8 % y la industria con un 28.6 %. A nivel nacional, del consumo final energético en México 4,896 *PJ*, el sector residencial sigue siendo el tercer consumidor, representa el 18.8 %, lo anteceden la industria con un 32 % y el transporte con un 45.9 %.

Del 18.8 % (921.48 *PJ*) que representa el consumo final del sector residencial, el 30.4 % (279.91 *PJ*) corresponde al consumo en energía eléctrica [3]. A su vez, la *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía* (CONUEE) [4] plantea rangos y promedios del consumo de energía eléctrica por usos finales en diferentes zonas climáticas del país, en donde la iluminación representa aproximadamente un 22 % en promedio para las

diferentes zonas climáticas y la climatización por calentamiento y enfriamiento un 45 %.

Según esta distribución, los criterios enfocados a los consumos de iluminación y climatización en las edificaciones pueden significar un ahorro energético considerable, dotando de una iluminación natural a todos los espacios cuando sea posible, definiendo ventanas de dimensiones y proporciones acordes a las características ocupacionales y funcionales, a las condiciones climáticas del sitio y los usos a los que se ven sometidos los espacios, aunado a la propuesta de tonos en acabados y materiales constructivos que benefician el aprovechamiento de la iluminación natural y reduzcan el gasto energético por iluminación, sin olvidar, el desempeño térmico. La implementación de estas estrategias, puede generar una reducción en el consumo energético por iluminación y climatización entre el 30 % y el 80 % respecto a las construcciones actuales [5]. Iluminar con luz natural un edificio o un espacio considera algo mucho más complejo que la solución a un problema de consumo energético o incluso la incorporación de un recurso estético a la arquitectura. La iluminación de espacios interiores por medio de luz natural hace más saludables y confortables los espacios para los ocupantes y también se relaciona con una mayor productividad [6], por lo que uno de los retos actuales en materia de diseño de iluminación natural considera el cumplimiento de la normatividad oficial mexicana y parámetros internacionales.

En México existen normativas que buscan aumentar la eficiencia energética en las edificaciones como la NOM-008-ENER-2001, eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales [7] y otras que establecen las condiciones de iluminación de acuerdo al uso de los espacios, como lo es la NOM-025-STPS-2008, condiciones de iluminación en los centros de trabajo [8]. Esta norma tiene por objetivo establecer los requerimientos de iluminación en las áreas de trabajo para, de este modo, contar con la cantidad de iluminación requerida para cada actividad visual, a fin de proveer un ambiente seguro y saludable en la realización de las tareas que desarrollen los usuarios. Para evaluar los niveles mínimos de iluminación que deben incidir en el plano de trabajo, esta norma, reconoce diversas condiciones de iluminación con el propósito de identificar aquellas áreas del centro de trabajo y las tareas visuales asociadas a los puestos de trabajo, asimismo, identificar aquellas donde exista una iluminación deficiente; para lo cual define los niveles mínimos de iluminación para cada una de las áreas de trabajo. La NOM-025-STPS-2008 está limita-

da en cuanto a su alcance por varias razones:

- No considera la iluminación natural, por lo que la orientación, dimensionamiento de vanos y/o ventanas, componentes de conducción y paso de iluminación natural, tonos y materiales en acabados, e incorporación de aleros o parasoles como elementos de control quedan fuera de las consideraciones.
- Establece los niveles máximos permisibles del Factor de Reflexión, sin embargo carece del uso de parámetros de evaluación que permitan identificar la falta de homogeneidad en la iluminación que puede provocar deslumbramiento.

Ya que la luz natural es un elemento esencial de la capacidad que tiene el ser humano de ver y necesaria para apreciar la forma, el color y la perspectiva de los objetos que lo rodean en su vida diaria se le reconoce, a ésta, como un elemento importante en la arquitectura y una estrategia útil en el diseño de edificaciones energéticamente eficientes.

Según varios estudios, las personas tienden a preferir la luz natural en las actividades cotidianas y los espacios de trabajo [9, 10]. Esto implica grandes beneficios tanto para la salud como para el bienestar de los ocupantes, involucrando aspectos fisiológicos, psicológicos, y económicos [11, 12]. Generalmente la luz natural se prefiere por varias razones:

1. Mejora la satisfacción de los trabajadores y con ello también su productividad [9].
2. Permite mejorar la calidad visual en términos de las propiedades de representación de color [12].
3. Su uso permite una reducción del consumo de electricidad para la iluminación artificial [11, 13].

Hasta la fecha, la luz artificial no es capaz de reproducir ni el espectro electromagnético, ni la variabilidad instantánea de la luz natural [14]. Estas razones pueden dar lugar a un diseño que solo tiene como objetivo maximizar el aprovechamiento de la luz natural. Sin embargo, una alta disponibilidad de luz natural, por ejemplo, en un entorno de oficina, puede perjudicar la obtención de condiciones visuales óptimas [9]. De hecho,

la luz natural excesiva puede implicar niveles de iluminación demasiado altos o un ambiente de luz no uniforme [13], provocando discomfort lumínico al mismo tiempo que un discomfort térmico, resultado de la ganancia térmica por radiación solar.

La incorporación de estrategias de iluminación natural en las primeras etapas de planificación y/o diseño de las edificaciones ayuda a evitar conflictos de diseño en etapas más avanzadas. La evaluación del desempeño térmico y lumínico en las edificaciones existentes, podría permitir implementar medidas correctivas que beneficien el confort y aumenten la productividad.

El correcto diseño de un sistema de iluminación debe tener en cuenta el confort lumínico. Dentro de los aspectos más importantes por considerar, están la distribución de la iluminación, la eficiencia de la iluminación y la composición espectral de la luz. Se requiere de un proceso de diseño integral, de esta manera, las estrategias de iluminación natural deben equilibrarse con otros objetivos de diseño ya que cuando se diseña con un control de deslumbramiento adecuado y se minimiza la ganancia de calor solar, se puede conseguir una iluminación de alta calidad al tiempo que se reduce el consumo de energía por iluminación o mejorar el confort higrotérmico en caso de no usar acondicionamiento de aire. En el diseño preliminar de las edificaciones, así como en el diseño de los elementos que captan, dirigen y distribuyen la luz natural, en conjunto con el criterio visual interior y los requerimientos básicos de iluminación deben de ser conocidos y definidos con antelación a la construcción de la edificación, para lo cual existen métodos de cálculo de luz natural [15] que se pueden clasificar en: a) métodos de predimensionado, b) método de punto por punto y c) método de cálculo con ordenador. Además de existir sistemas de evaluación mediante modelos a escala. El método de predimensionado es aquel donde el resultado que da es el valor medio de la iluminancia sobre un plano de trabajo situado a poca altura del suelo en un espacio interior; utiliza solo la luz cenital como fuente de luz y permite conocer aproximadamente la cantidad de luz que penetra en el espacio y deducir a partir de ello la iluminancia media resultante en el plano de trabajo. El método de punto por punto es el que calcula la iluminancia resultante para cada uno de los puntos escogidos que están formando una malla de metro por metro y considera cada una de las aberturas como superficies emisoras difusas. Y, el método de cálculo con ordenador, es el que utiliza las potencialidades del cálculo informático para integrar los resultados de la luz que llega

a cada punto, procedente, tanto de las aberturas como de las reflexiones interiores; el método de punto por punto aplica con todas las reiteraciones necesarias para obtener una gran exactitud. De la misma manera, las evaluaciones sobre los niveles de iluminación y confort lumínico, pueden ser realizadas experimentalmente o numéricamente. La viabilidad de poder realizar las evaluaciones a través de métodos numéricos o simulaciones mediante el uso de la computadora, favorecen los diseños y las propuestas de los espacios habitables. Las simulaciones numéricas pueden ser utilizadas para perfeccionar los diseños de los espacios y las áreas de trabajo, considerando con antelación el comportamiento de la luz natural, así como el cumplimiento de los parámetros de evaluación para el confort lumínico. Existen programas computacionales que proveen una buena opción para simular el comportamiento de la iluminación natural y el comportamiento térmico de los espacios ya sea en proceso de diseño o existentes; como lo son Radiance [16] para la parte de iluminación y EnergyPlus [17] para la parte térmica, utilizando SketchUp [18] como programa para representar digitalmente la geometría de los espacios y OpenStudio [19] como interfaz para el uso de Radiance y EnergyPlus:

- Radiance es un programa de código abierto y uso gratuito que permite realizar simulaciones dinámicas de iluminación precisas y físicamente válidas, donde las simulaciones dinámicas consideran un cielo para cada hora y cada día de acuerdo a las condiciones climáticas y la trayectoria solar aparente. Este programa trabaja con archivos de entrada que especifican la geometría de la escena, materiales, luminarias, el tiempo, la fecha y las condiciones de cielo para cálculos de iluminación natural [16]. Emplea un método que comienza en un punto de medición (por lo general un punto de vista) y traza los rayos de luz hacia atrás de las fuentes (es decir, de los emisores); el cálculo de la iluminación considera los componentes de luz directa, especular indirecta y difusa.
- EnergyPlus es un programa de código abierto y uso gratuito que permite realizar simulaciones térmicas y energéticas de las edificaciones. Este programa se basa en un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo en una dimensión [17].
- SketchUp es un programa con versión gratuita y versión de paga, que permite el modelado en tres dimensiones para una amplia gama

de formas y aplicaciones de dibujo. Trabaja con extensiones hacia otros programas, permitiendo crear las geometrías necesarias incluyendo herramientas de dibujo [18].

- OpenStudio es un programa de código abierto y uso gratuito que conjunta diversas herramientas de dos programas; utiliza Radiance para el análisis de la iluminación natural, y EnergyPlus para el modelado energético de un edificio. Incluye una extensión con SketchUp, un panel de ejecución y un visor de resultados [19].

El objetivo de esta tesis es utilizar OpenStudio para simular la iluminación natural y el comportamiento térmico de la oficina de la dirección del Instituto de Energías Renovables, UNAM (IER-UNAM), que tiene un tubo solar instalado en la cubierta. Y evaluar tres casos de estudio propuestos, además del caso de estudio del estado actual: caso de estudio sin tubo solar, caso de estudio con vidrio difuso y caso de estudio con extensión de tubo solar, mediante parámetros que determinan el confort lumínico y el desempeño térmico, además de aportar posibles soluciones.

Para contextualizar este trabajo, se presenta una revisión bibliográfica sobre los estudios de iluminación natural y desempeño térmico en edificaciones sin el uso de aire acondicionado. Diversos autores han analizado los sistemas de iluminación natural [20,21] y el desempeño térmico bajo condición de no uso de aire acondicionado [22], a partir de la representación digital de diversos espacios para evaluar la iluminación natural [23–27] de los cuáles se obtienen resultados a partir de simulaciones [28,29] haciendo uso de las herramientas computacionales, así como de la tecnología disponible; además de la definición de parámetros de evaluación para el confort lumínico [30–32] y térmico [33]. A continuación se describen brevemente los trabajos citados anteriormente, por orden cronológico.

Tregenza y Waters [28] introducen el concepto de coeficiente de luz natural, y lo calculan mediante funciones matemáticas que establecen una relación entre la distribución de la iluminancia del cielo y la iluminancia en un punto al interior de una habitación, considerando que la luz que incide sobre una superficie al interior de una habitación depende de dos factores: la luminancia del cielo y su forma y los materiales de las superficies circundantes; para la mayoría de los casos consideran ambos factores como independientes entre ellos.

Pérez *et al.* [24] presentan el desarrollo de varios modelos matemáticos para predecir la disponibilidad de la luz natural y las cantidades de

radiación utilizadas en simulaciones de sistemas de energía o para los diseños de edificaciones. Modelan la radiación global, directa y difusa, y la iluminación que incide sobre las superficies inclinadas o de orientación arbitraria, contribuyendo a cerrar la brecha entre los datos de radiación disponible y las necesidades específicas del usuario. Presentan resultados de la validación en donde la exactitud de los modelos se analiza tanto en función de las condiciones de insolación como del clima del sitio.

Pérez *et al.* [25] presentan el desarrollo y evaluación de un nuevo modelo matemático para describir, a partir de mediciones de irradiancia, la iluminancia instantánea del cielo medida con un modelo matemático de distribución angular para todas las condiciones de cielo, desde nublado, parcialmente nublado hasta despejado, tomando en cuenta el cambio de la distribución espacial de la luz en función de las condiciones de insolación; con limitaciones por la naturaleza aleatoria de los patrones de las nubes.

Morillón [34] presenta una metodología de evaluación y delimitación de las condiciones de confort higrotérmico a partir de datos climáticos y la posición central de la zona de confort de acuerdo a la temperatura de neutralidad que varía conforme el lugar y la estación del año. Calcula la amplitud de la zona de confort y define las condiciones de sensación térmica, de acuerdo a la temperatura y humedad relativa horaria.

Ochoa y Capeluto [21] presentan un enfoque cualitativo y cuantitativo para evaluar los sistemas de iluminación natural para su uso en edificios de oficinas ubicados en latitudes donde los niveles de iluminación natural a lo largo del año son altos debido a la radiación solar donde la penetración excesiva de la radiación directa puede ser un problema. A partir de un modelo utilizando el programa Radiance, simulan y comparan la iluminación y el rendimiento del deslumbramiento de tres sistemas distintos que afectan la penetración de luz natural en un espacio de oficinas; el primero con una sola ventana sin ninguna protección, el segundo con una repisa horizontal a la mitad de la ventana y el tercero con un concentrador de luz natural parabólico en la parte superior de la ventana.

Paroncini *et al.* [20] presentan los resultados del monitoreo de un tubo de luz ubicado en el interior de un laboratorio de aproximadamente 9 m^2 sin ventanas. Durante 17 meses dieron seguimiento con un luxómetro a la distribución de la iluminancia en un plano de trabajo, midiendo la iluminación interior y exterior y reportando la relación entre ellas.

Bourgeois *et al.* [26] proponen un modelo de coeficiente de luz estándar

para simulaciones dinámicas de iluminación natural; lo cual implica la definición de un formato de datos estándar y coeficiente de luz que acompañan a los conceptos de los programas computacionales con fines de simulaciones dinámicas (variables de acuerdo al tiempo debido a los cambios en las condiciones del cielo y la configuración del dispositivo de sombreado), las cuales consideran las fuentes de iluminación natural controladas de forma independiente, por ejemplo, ventanas, domos y/o cualquier otro tipo de vano.

Christian *et al.* [29] presentan una herramienta de simulación para iluminación natural y análisis térmico. Utilizan una metodología de trazado de rayos y radiación acoplada para derivar los niveles de luz natural para diferentes condiciones de cielo; logrando obtener la distribución detallada de la luz natural para un día en particular conforme el tiempo y los valores por hora sobre una base anual. Realizan una simulación integrada usando Radiance como programa de validación, obtienen la distribución de la luz natural detallada para un día en particular, por hora; y muestran la exactitud del método de cálculo de luz natural implementado, siendo éste adecuado para predecir las consecuencias de energía de control de iluminación fotosensible.

Danny [23] realiza una revisión de iluminancia por luz natural y las reducciones de energía de iluminación debido a los esquemas para iluminación natural. El estudio incluye mediciones de luz natural, además de predicciones de la iluminancia bajo diversas condiciones de cielo.

Reinhart y Wienold [27] haciendo uso de las herramientas computacionales y la tecnología disponible presentan un método de análisis de diseño integrado, en donde introducen y consideran de manera simultánea la capacidad anual de la luz natural disponible, el confort lumínico y el uso de energía para iluminación; con el fin de determinar los perfiles de sombreado anuales y las condiciones de confort lumínico a lo largo de un espacio. Las simulaciones se utilizan para calcular la autonomía de la luz natural, las cargas de energía, los costos energéticos de funcionamiento y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Sicurella *et al.* [33] presentan un enfoque para la evaluación simultánea del confort lumínico y térmico, tomando como referencia la influencia del tamaño y la tipología de una ventana, pudiendo ser aplicado en cualquier análisis de energía del edificio donde se requiera una comparación entre diferentes soluciones o estrategias. Establecen un análisis comparativo entre la frecuencia de las condiciones de confort térmico (FCT) y la frecuencia

de confort visual (FCV), así como entre la intensidad del discomfort térmico (IDT) y la intensidad del discomfort visual (IDV).

Leslie *et al.* [30] proponen una métrica de la iluminación natural a partir del potencial de un diseño mediante siete objetivos: iluminancia promedio, cobertura, luz natural difusa, autonomía de la luz natural, estímulo circadiano, zona de acristalamiento y ganancia de calor solar. La métrica permite tomar decisiones con conocimiento de causa en la fase conceptual del diseño, y a lo largo del desarrollo. La propuesta considera que los ocho objetivos deben ser priorizados según corresponda a proyectos individuales.

Barrios *et al.* [22] analizan cinco parámetros para evaluar el desempeño térmico de envolventes y cubiertas para edificios sin aire acondicionado. Determinan qué parámetros son efectivos para este fin y cuales no los son: la energía transferida a través de la envolvente, el factor de decremento (FD) y los horas-grados de discomfort (HGD), son parámetros adecuados, mientras que la transmitancia y la admitancia térmica en estado estacionario y el factor de decremento superficial no son parámetros adecuados.

Aries *et al.* [31] presentan una revisión con una visión general de una búsqueda de la literatura científica sobre los efectos comprobados de la exposición de la luz natural en la salud humana. Crean una subdivisión de las asociaciones de la salud con la luz natural, y generando propuestas de implementaciones prácticas para el diseño de edificios.

Carlucci *et al.* [32] presentan una descripción, categorización y análisis de los índices de confort lumínico, tales como la cantidad de luz, la uniformidad de la luz, la calidad de la luz, y la calidad de representación de la luz; además de generar recomendaciones para su uso, sugieren áreas que pueden mejorarse con el fin de optimizar los procesos para un diseño integral de las edificaciones. Establecen que ninguno de los índices revisados se puede tomar a priori como un único parámetro para representar un entorno visual, ya que el confort lumínico se ve afectado por diferentes factores coexistentes.

De estos estudios, la mayoría evalúan y desarrollan modelos matemáticos, además de simulaciones [22–29] a partir de prototipos para la revisión de los cálculos de la luz natural y de las reducciones de energía eléctrica por iluminación debido a los sistemas de iluminación natural [20, 21]. Del mismo modo, algunos de estos estudian el desempeño térmico, además de los parámetros aceptados para el confort lumínico y térmico [30–33].

En el capítulo 2 se describen las características y componentes de la

iluminación, los sistemas y estrategias de iluminación natural utilizados comúnmente en climas cálidos; además de los parámetros de evaluación para el confort lumínico y el desempeño térmico. En el capítulo 3 se realizan simulaciones con el fin de validar el uso de OpenStudio como interfaz de Radiance, conforme simulaciones previas reportadas en la literatura y mediciones experimentales. En el capítulo 4 se presentan cuatro casos de estudio a partir del espacio existente, oficina de la dirección del IER-UNAM, con un tubo solar en la cubierta, de los cuales se realizan las simulaciones correspondientes en Radiance y EnergyPlus, y se evalúan de acuerdo a los parámetros para el confort lumínico y el desempeño térmico. Por último en el capítulo 5 se presentan las conclusiones finales.

Capítulo 2

Iluminación

De los diversos tipos de energía que se encuentran al alcance del ser humano, la luz es uno de los más importantes, siendo necesaria para poder observar y apreciar los colores, las formas y las perspectivas de los objetos, además de generar un bienestar hacia las personas; por ello la importancia que adquiere la iluminación natural de los espacios y las edificaciones deja de ser un propósito y se convierte en una necesidad. Una adecuada iluminación natural no solo se considera un medio de ahorro, de mejora de la salud del usuario o una idónea habitabilidad de los espacios, sino que amplifica su valor al integrar y optimizar el uso de la luz natural como un recurso de diseño y construcción de los espacios. Para lo cual se utilizan, evaluaciones precisas de la disponibilidad de luz natural, las ganancias térmicas derivadas de la radiación del sol y diseños adecuados de los espacios y edificaciones. Actualmente un número considerable de estudios están en curso en todo el mundo para integrar y optimizar el uso de la luz natural en el diseño de las edificaciones. Parámetros como *autonomía de luz natural* [35,36], *autonomía continua de luz natural* [37] e *iluminancia útil por luz natural* [38,39], se pueden utilizar para evaluar y optimizar el uso de la luz natural en los espacios. En materia de diseño, existen diversos elementos que optimizan el aprovechamiento de la luz natural en los espacios, como pueden ser vanos, ventanas, orientación, materiales, acabados, recubrimientos, colores, alturas, principalmente; y

elementos de sombreado, para los climas cálidos cuando el control de la radiación solar, combinado con la ventilación de los espacios pueden reducir significativamente o hasta evitar la demanda de aire acondicionado y mejorar la calidad del ambiente al interior. En la sección 2.1 se describen las características de la luz. En la sección 2.2 se analizan los sistemas y estrategias de iluminación natural utilizados comúnmente en climas cálidos. En la sección 2.3 se describen las consideraciones para el confort lumínico y térmico. En la sección 2.4 se describen los parámetros más usados para la evaluación de la calidad luminosa entorno a las edificaciones y el desempeño térmico en las mismas. Por último, en la sección 2.5 se presenta la metodología propuesta para evaluar el desempeño lumínico y térmico de las simulaciones.

2.1. Iluminación

Luz

Según la teoría de Einstein que explicaba el *fenómeno fotoeléctrico* publicada en 1905, la Luz se compone de partículas (paquetes sin masa de energía electromagnética concentrada) que reciben el nombre de fotones, emitidas por las fuentes luminosas [40]. En el caso de la luz natural, éstas son emitidas por el Sol. La luz es energía que se emite por cargas eléctricas aceleradas, en muchos casos en electrones al interior de los átomos. Esta energía es propagada en una onda parte eléctrica y parte magnética (siendo ésta una onda electromagnética) en cualquier espacio, y es capaz de viajar a través del vacío a una velocidad aproximada de 300,000 kilómetros por segundo. La luz visible es una porción pequeña de una amplia familia de ondas electromagnéticas, inmersa en longitudes de alrededor de 380 a 780 nanómetros, siendo el rango en el que el ojo humano es capaz de percibir; la gama de estas ondas electromagnéticas se denomina espectro electromagnético, el cual se muestra en la Figura 2.1.

Siendo que la luz es energía transportadora por ondas electromagnéticas generadas por cargas eléctricas que vibran, cuando la luz incide en la materia obliga a los electrones de la misma a vibrar, generando así que las vibraciones de un emisor se transfieren al receptor. La respuesta exacta de un material receptor a una onda de luz que incide en él depende de la frecuencia de la luz y de la frecuencia natural de los electrones del mate-

rial. La luz visible vibra con gran rapidez: más de 100 billones de veces por segundo (10^{14} hertz). Para que un objeto con carga responda a estas vibraciones ultrarrápidas debe tener muy poca inercia. El vidrio es un material que permite el paso de la luz en línea directa [41]. La penetración de la luz natural hacia el interior de las edificaciones incide de tres maneras: luz directa, luz difusa y luz de albedo o reflejada.

- La luz directa, es aquella en la cual el rayo se dirige en una sola dirección a partir de la fuente de luz hacia la superficie. Si el rayo de luz no es interferido por ningún obstáculo, se considera que la superficie está iluminada por luz directa. El rayo que incide genera en los espacios interiores manchas de luz de contornos precisos, los cuales se van recorriendo con el movimiento aparente del sol. Por lo tanto se considera una luz poco confortable debido al exceso de contraste en las condiciones visuales interiores, provocando además un sobrecalentamiento al interior.
- La luz difusa, es la luz dispersada de manera aleatoria al incidir sobre una superficie irregular [42], generando una iluminación homogénea en la superficie y haciendo que las sombras de los objetos sean menos nítidas en la medida que estos se alejen de la superficie.
- La luz de albedo, es aquella reflejada por una superficie a partir de la radiación que incide sobre de ella.

La percepción espacial de los objetos, así como su forma y sus colores, están condicionados a la sensibilidad del ojo humano a través de la visión, entendiendo a ésta, como la capacidad de interpretar el entorno a partir de los rayos de luz que alcanzan el ojo durante el día y la noche de acuerdo a la sensibilidad del ojo humano como se observa en la Figura 2.2. Existen dos visiones: escotópica y fotópica.

- Visión escotópica, es aquella que nos permite ver de noche, la cual se da gracias a los bastones del ojo, responsables de la capacidad de ver con poca luz y los cuales son sensibles a niveles muy bajos de iluminación, eliminando la sensibilidad al color, y el máximo de sensibilidad se mueve al lado izquierdo del espectro visible como se observa en la Figura 2.2.

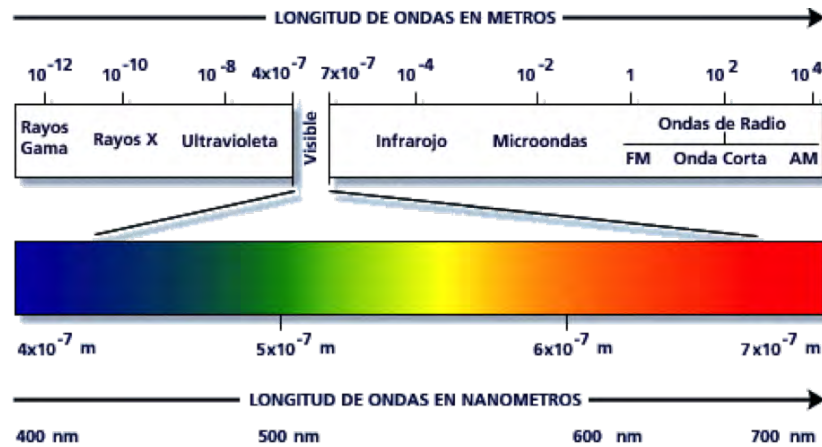


Figura 2.1: Espectro electromagnético, es una gama continua de ondas que va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Los nombres descriptivos de las diferentes secciones no son más que una clasificación histórica, ya que todas estas ondas son de la misma naturaleza y difieren principalmente en cuanto a frecuencia y longitud de onda; todas tienen la misma rapidez [41].

- **Visión fotópica**, es aquella que nos permite ver de día y distinguir los colores, se produce gracias a los conos del ojo, aunque con distinta sensibilidad según la longitud de onda. La máxima sensibilidad corresponde a un color amarillo-verdoso en una longitud de onda de 555 nm , a partir de este punto y hacia los dos extremos del espectro electromagnético la sensibilidad disminuye hasta anularse como se observa en la Figura 2.2.

De entre los diversos componentes y elementos de medición para la iluminación que facilitan el análisis y comportamiento de la misma, en esta tesis se presentan algunas de las variables físicas y unidades relacionadas con iluminación:

- **Lumen (lm)**, es la unidad del Sistema Internacional de Medidas utilizado para medir el flujo luminoso [43].

$$1lm = 1cd \cdot sr = 1lx \cdot m^2. \quad (2.1)$$

- **Candela (cd)**, es la unidad de medida con la que se mide la intensidad de la luz, está definida como $1/683 \text{ W/sr}$ de una fuente de luz

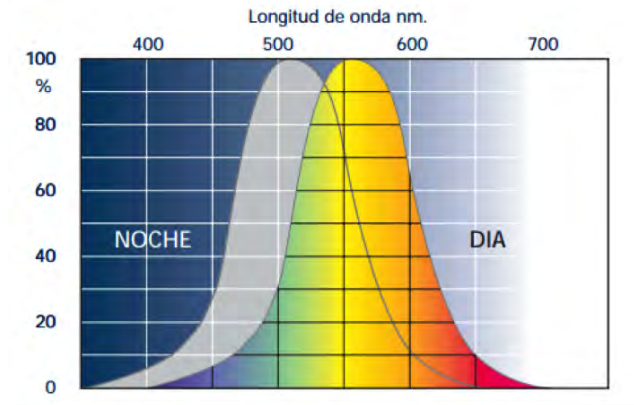


Figura 2.2: Curva de sensibilidad del ojo humano.

monocromática a 540 THz a 555 nm , que corresponde con una luz en la región máxima de sensibilidad cromática del ojo. Si una fuente luminosa emite una candela de intensidad luminosa uniformemente en un ángulo sólido de 1 sr , su flujo luminoso total emitido en ese ángulo es de 1 lm [43].

- Lux (lx), se define como un lúmen lm por metro cuadrado y es una unidad de iluminancia. En término equivalente es la densidad de flujo luminoso. Como tal, mide la cantidad de luz visible que golpea contra una superficie [43].
- Flujo radiante (F_r), es la cantidad de energía emitida por una unidad de tiempo, se denomina como la medida de la radiación electromagnética producida por una fuente. Su unidad de medida es el watt (W), siendo este una unidad de potencia equivalente a 1 Joule por segundo (1 J/s) [43].
- Flujo luminoso (F_l), es la energía por tiempo unitario (dQ/dt), que es irradiado por una fuente de longitudes de onda visibles, siendo estas, de aproximadamente 330 nm a 780 nm . De esta manera el flujo luminoso es un promedio ponderado del flujo radiante en el espectro visible. Está ponderado de manera promedio, porque el ojo humano no responde de igual manera a todas las longitudes de onda visibles (visión fotópica y visión escotópica). Este factor de ponderación, o eficacia luminosa (V_λ), permite la conversión del flujo radiante F_r en

flujo luminoso F_l en cualquier longitud de onda. El lumen lm es la unidad del flujo luminoso, y se define en términos de la candela cd . Bajo condiciones fotópicas una luz cromática de 555 nm (color verde) con un flujo radiante de 1 W , genera un flujo luminoso de 683 lm , que corresponde con la máxima respuesta del ojo humano:

$$F_l = K_m \int_{380\text{ nm}}^{760\text{ nm}} V_\lambda F_{r\lambda} d\lambda, \quad (2.2)$$

donde el F_l se expresa en lúmenes, K_m es la constante considerada como 683 lmW^{-1} para condiciones fotópicas y 1699 lmW^{-1} para condiciones escotópicas, V_λ es el valor adimensional de ponderación o eficacia luminosa y $F_{r\lambda}$ es el flujo radiante en watts por longitud de onda [43].

- Intensidad luminosa (I_{t_l}), es la cantidad de flujo luminoso F_l emitido en un cono, a partir de una dirección dada dividido por el ángulo sólido del cono (ω). Su unidad de medida es la candela [44].

$$I_{t_l} = \frac{F_l}{\omega}. \quad (2.3)$$

- Nivel de iluminación o Iluminancia (Il), es la medida fotométrica para la densidad del flujo luminoso, se define como la relación del flujo luminoso que cae sobre una superficie de área (S), la fórmula es:

$$Il = \frac{F_l}{S}. \quad (2.4)$$

donde F_l corresponde al flujo luminoso y S a la superficie de área [43].

- Luminancia (L), que deriva de una fuente o de una superficie, se define como la intensidad luminosa emitida, por la fuente o la superficie, en la dirección de un observador, dividida por el área de la fuente o la superficie vista por el observador, es decir por unidad de área proyectada. Su unidad es la candela por metro cuadrado (cd/m^2) [44].

$$L = \frac{F_l \alpha}{A \cos \alpha}, \quad (2.5)$$

donde $F_l \alpha$ es la intensidad de la fuente en la dirección del ángulo α y el producto de $A \cos \alpha$ es el área proyectada perpendicular a la dirección de visión.

- Reflectancia (R), es la proporción de la luz visible que es reflejada por una superficie, y por lo tanto su valor varía entre 0 y 1 [45].
- Deslumbramiento (D), es la alteración de la perceptibilidad visual ante la presencia de altas luminancias o altos contrastes de luminancias en el campo visual. Para el caso de la observación directa, la máxima luminancia tolerable por el ojo humano es de $7,500 \text{ lx}$ [45]. Con respecto a la distribución de la luz y evitar generar deslumbramientos, se recomienda tener una iluminación homogénea en lugar de una iluminación localizada o puntual. Los deslumbramientos pueden ser directos, cuando provienen de una fuente de luz brillante de manera directa en la línea de visión; o bien reflejados cuando la luz se refleja en una superficie de alta reflectancia.

2.2. Sistemas y estrategias de iluminación en climas cálidos.

En México, la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), clasifica las diversas regiones del país, de acuerdo a las condiciones climáticas, y a su desempeño relativo en materia de consumo de energía y la reducción de los gases de efecto invernadero [46]. Conforme esta clasificación define 10 regiones climáticas: Semifrío-seco, Semifrío, Semifrío-húmedo, Templado-seco, Templado, Templado-húmedo, Cálido-seco, Cálido seco-extremoso, Cálido-semihúmedo y Cálido-húmedo.

En la mayoría de los climas cálidos el cielo puede producir un gran resplandor en todas las direcciones y la radiación solar directa representa un porcentaje importante de la radiación solar incidente en una superficie, por lo que es importante iluminar los espacios cuidando no tener ganancias térmicas que comprometan el confort higrotérmico. Dentro del diseño y construcción de los espacios se deben utilizar los recursos arquitectónicos para controlar la iluminación natural y conseguir los niveles adecuados. Para los climas cálidos se recomiendan para los vanos y/o ventanas orientaciones hacia SO, S y SE, aún cuando existen temporalidades para las ganancias de energía; en verano se sugiere orientación norte, favoreciendo así una iluminación uniforme, y evitar orientación E y O derivado de la cantidad de radiación que se puede alcanzar. Componentes como cubiertas transparentes o vanos en losas, pueden proporcionar los máxi-

mos niveles de iluminación natural al interior de los espacios, sin embargo en los climas cálidos, representan un gran riesgo ante la ganancia térmica derivado del exceso de radiación que se puede llegar a presentar en verano; siendo entonces los elementos como patios interiores o de transparencia, así como pórticos, balcones, y vestíbulos, los que pueden proporcionar niveles de iluminación natural moderados a espacios que usualmente tenderían a ser oscuros para favorecer el confort térmico. Aunado a estos, existen los elementos de protección solar, como son, aleros, parasoles, persianas, cortinas, toldos, celosías, *louvers*, postigos, remetimientos y salientes en fachadas, vegetación externa, el uso de materiales aislantes, de revestimientos reflectantes, y pantallas de sombra principalmente. Estos adquieren aplicaciones diversas, según la orientación de las superficies o espacios a proteger. En vanos o fachadas norte y sur, se recomienda el implementar aleros o elementos y salientes horizontales; en vanos o fachadas este y oeste se recomienda el implementar parasoles o elementos y salientes verticales; así como todos los remetimientos necesarios para el control y protección solar.

Sistemas de Iluminación natural

Los sistemas de iluminación natural se pueden considerar como medios de ahorro, tanto como factores para la mejora de la salud y el confort del usuario enfocados en la habitabilidad del espacio, y como recursos para la expresión formal de la arquitectura o los espacios; siempre optimizando la distribución de la luz natural en las zonas periféricas y proporcionando una adecuada penetración de la luz natural hacia las zonas interiores que carecen de contacto directo con el exterior. La cantidad, calidad y distribución de la luz interior depende del funcionamiento conjunto de los sistemas de iluminación, de la ubicación de las aberturas y de la superficie de las envolventes. Básicamente son tres los sistemas de iluminación natural utilizados:

- Iluminación lateral, la luz llega desde una abertura ubicada en un muro lateral, y es por eso que la iluminancia del plano de trabajo cercano a la ventana tiene un nivel alto y aporta en forma importante a la iluminación general. Entre más alejado de la ventana, el valor de la iluminación decrece rápidamente y la proporción relativa de la componente indirecta (reflejada y difusa) se incrementa. Sin em-

bargo, la cantidad y distribución de la luz que ingresa lateralmente a través de una abertura en un muro depende fundamentalmente de la orientación del muro donde la misma está emplazada, debido a que en general, las ventanas orientadas al sur reciben sol (iluminación directa) desde el amanecer hasta el atardecer, las orientadas al este solo permiten el ingreso de la radiación directa desde el amanecer hasta el medio día, las ubicadas al oeste desde el medio día hasta el atardecer y las emplazadas hacia el norte no reciben aporte de iluminación directa, solo reciben iluminación difusa y reflejada [47].

- Iluminación cenital, se utiliza generalmente en las localidades con predominio de cielos nublados. El plano de trabajo es iluminado directamente desde la parte más luminosa de estos tipos de cielo, el cenit. La proporción de luz indirecta generalmente no excede el 25% [47].
- Iluminación combinada, en esta iluminación existen las aberturas tanto en muros como en techos o cubiertas. En un interior donde la envolvente no está claramente dividida en muros y techos, por ejemplo en cerramientos abovedados, se considera como iluminación lateral si la abertura es más baja o esta por debajo de los 2.5m de altura, por encima de esta altura se considera como iluminación cenital o superior. En una iluminación combinada, la relación de la componente directa e indirecta de la iluminación puede ubicarse entre los dos extremos (muros y techos) [47].

Bajo este principio, se plantea una clasificación de estos sistemas a partir de los componentes de paso de la luz y los componentes de conducción de la luz:

- Para los componentes de paso de luz natural, se consideran a todos los dispositivos existentes en las edificaciones a través de los cuales pasa la luz (aperturas, vanos y/o ventanas), desde un ambiente lumínico hacia uno contiguo. Estos componentes se definen por sus características geométricas (tamaño, forma geométrica, y ubicación conforme al cerramiento, ya sea central, lateral, alto, bajo, etc.) y su composición (elementos para controlar y regular el paso del aire y las acciones lumínicas y visuales) como se puede observar en la Figura 2.3 [48].

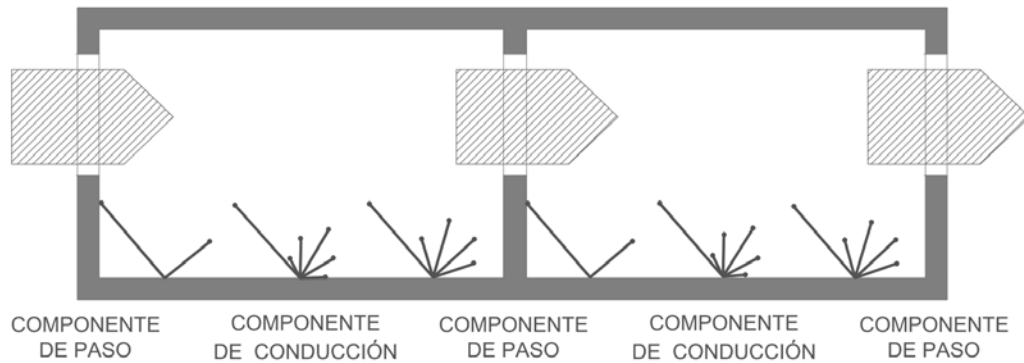


Figura 2.3: Componentes de iluminación natural. Componentes de conducción y componentes de paso [48].

- Para los componentes de conducción de la luz natural, se consideran a todos aquellos que llevan la luz natural del exterior hacia espacios interiores en las edificaciones. Y de manera interna se denominan componentes de conducción a todos aquellos que recogen la luz natural captada por el componente de paso y la conducen hacia el siguiente componente de paso y así sucesivamente formando una serie continua. Estos componentes se definen por sus características y composición ya que pueden ser superficies reflectoras, especulares, difusas, absorbentes, etc. Estos componentes se pueden situar tanto en el interior (espacios de luz intermedios) como en el exterior (espacios perimetrales o fachadas) de las edificaciones, como se puede observar en la Figura 2.3 [48].

Dentro de los sistemas de iluminación natural existen también los denominados conductores de sol, espacios no habitables diseñados específicamente para conducir los rayos del sol a zonas oscuras que no cuentan con ningún tipo de vano, abertura y/o ventana que permita la penetración de luz natural; comúnmente, son espacios que se encuentran cercanos o contiguos a los núcleos de las edificaciones o bien por la zonificación de las mismas no cuentan con iluminación natural; como se puede observar en la Figura 2.4. Estos conductores se diseñan conforme la trayectoria solar, e intentan captar la mayor cantidad de rayos del sol de invierno y rechazar la incidencia de los rayos del sol de verano. En su interior están conformados por superficies reflectoras de tipo especular. El componente

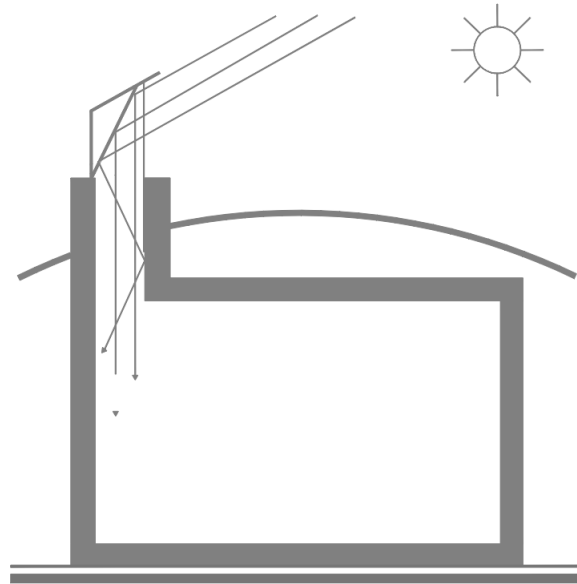


Figura 2.4: Conductor de sol [48].

para captar la radiación está proyectado ya sea fijo o móvil con el objetivo de recoger eficazmente los rayos de sol, y está diseñado para favorecer el acceso del sol en los horarios y periodos del año que más convenga [48].

Elementos de control

Para los sistemas de iluminación natural, existen diversos elementos de control, los cuáles están diseñados para hacer entrar y/o controlar la entrada de luz natural a través de un componente de paso. Dentro de sus características están su movilidad o posible regulación, la función de ventilación o visión controlada, protección térmica del espacio interior, o la seguridad de la edificación, así como las propiedades ópticas consideradas como la transparencia, la difusión y la reflexión de la luz. Conforme se genera el control de la luz natural, los elementos de control se clasifican en grupos generales [48]:

- Superficies separadoras, son elementos comúnmente de vidrio o de algún material transparente o traslucido, montadas normalmente en bastidores de aluminio, metal o madera, o bien colocadas a hueso en

los componentes de paso (vanos), separando dos ambientes distintos (comúnmente el exterior del interior). Una de sus características es permitir el paso de radiación, algunas veces la visión exterior, e impiden el paso del aire. De acuerdo a su geometría, pueden variar conforme a las proporciones, dimensiones, formas y materiales con los cuales están compuestas.

- Pantallas flexibles, son elementos que impiden el paso de la radiación solar parcial o totalmente y convierten la luz natural que los atraviesa en luz difusa, incorporados en los componentes de paso (vanos). Según su ubicación pueden permitir la ventilación y pueden generar privacidad visual. Tienen la función de retraerse o extenderse según convenga; pueden funcionar de forma manual o automatizada. Ejemplos de estos son los toldos, lonas y cortinas exteriores.
- Pantallas rígidas, como su nombre lo dice, son elementos rígidos que tienen la función de redirigir y/o bloquear la radiación solar directa que incide sobre los componentes de paso (vanos). Normalmente son elementos fijos que no tienen la función de regularse, sin embargo pueden llegar a existir automatizados con movimientos controlados. Ejemplos de estos son las repisas de luz, aleros, antepechos, parasoles, reflectores, y aletas, principalmente.
- Filtros solares, son elementos de carácter superficial que cubren de manera parcial o total a los componentes de paso (vanos), protegiendo de la radiación solar y permitiendo el paso del aire. Normalmente son fijos, sin embargo cuentan con la función de retraerse o extenderse según convenga, y la característica de poderlos adecuar a las orientaciones que mejor convenga, regulando y controlando así la incidencia de radiación solar al interior de los espacios. Ejemplos de estos, son las persianas y celosías.
- Obstructores solares, son elementos de materiales opacos con el objetivo de bloquear la radiación solar, los cuáles se adecuan a las aberturas de los componentes de paso (vanos), ya sea al interior o exterior de estos. Son elementos utilizados para el control visual y el aislamiento térmico, ya que actúan como una barrera que anula las interacciones entre el ambiente exterior y el interior. Ejemplos de estos son, las contraventanas y los postigos, conocidos como puerta o

apertura pequeña abierta en otra mayor.

2.3. Confort lumínico y térmico.

Confort lumínico

El confort es considerado como el estado físico y mental en el cual el ser humano manifiesta bienestar con el medio ambiente que lo rodea. El confort lumínico hace referencia al bienestar a través del sentido de la vista conforme los aspectos físicos, fisiológicos y psicológicos que están relacionados con la luz, a diferencia del confort visual, el cual hace referencia a los aspectos psicológicos relacionados con la percepción del espacio y los objetos [49].

Dentro del confort lumínico, existen diversas circunstancias que deben conjuntarse para que los sistemas de iluminación puedan proporcionar las condiciones necesarias:

- Iluminación homogénea.
- Colores adecuados.
- Evitar luces intermitentes o efectos estroboscópicos.
- Evitar brillos y deslumbramientos.
- Mantener un contraste adecuado.
- Niveles de iluminación apropiados según el tipo de ambiente o la actividad que se realice.

Para los niveles de iluminación apropiados según el tipo de ambiente o la actividad que se realice, para el caso de México, existen valores recomendados por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM.025-STPS-2008 [8], como se observa en la Tabla 2.1

Tabla 2.1: Niveles de iluminación en los centros de trabajo, Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008. Niveles Mínimos de Iluminación (L_{min}) [8].

Tarea Visual del Puesto de Trabajo	Área de trabajo	L_{min} [lx]
En exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimientos de vehículos.	Exteriores generales: patios y estacionamientos.	20
En interiores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Interiores generales: almacenes de poco movimiento, pasillos, escaleras, estacionamientos cubiertos, labores en minas subterráneas, iluminación de emergencia	50
En interiores	Áreas de circulación y pasillos, salas de espera, salas de descanso, cuartos de almacén, plataformas, cuarto de calderas.	100
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Servicios al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia, cuarto de compresores y pailería.	200
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas	300

Distinción moderada de detalles: maquinado y acabados delicados ensamble de inspección moderadamente difícil, captura y procesamiento de información manejo de instrumentos y equipo de laboratorio	Talleres de precisión: salas de cómputo, áreas de dibujo, laboratorios.	500
Definición fina de detalles: maquinado de precisión, ensamble e inspección de trabajos delicados, manejo de instrumentos y equipo de precisión, manejo de piezas pequeñas.	Talleres de alta precisión: de pintura y acabado de superficies y laboratorios de control de calidad.	750
Alta exactitud en la distinción de detalles: ensamble, proceso e inspección de piezas pequeñas y complejas, acabado con pulidos finos.	Proceso: ensamble e inspección de piezas complejas y acabados pulidos finos	1,000
Alto grado de especialización en la distinción de detalles	Proceso de gran exactitud. Ejecución de tareas visuales: de bajo contraste y tamaño muy pequeño por periodos prolongados; exactas y muy prolongadas, y muy especiales de extremadamente bajo contraste y pequeño tamaño	2,000

Confort térmico

El confort térmico hace referencia a las interacciones que existen entre las sensaciones fisiológicas, las psicológicas y el medio ambiente térmico que experimenta el ser humano frente a las condiciones impuestas por el medio ambiente; razón por la cual, las condiciones de comodidad térmica dependen de las variables climáticas: temperatura, humedad, velocidad del aire, y radiación incidente [50]. Existen métodos desarrollados desde finales del siglo pasado para determinar las condiciones de confort térmico, a partir de las cuales, se pusieron en curso normas y sugerencias conforme los valores de los parámetros de clima dentro de los cuales el ser humano se siente cómodo. Estos valores se diferencian de acuerdo a las zonas geográficas por condiciones de clima, en el caso de Gran Bretaña, el parámetro para el confort térmico está definido entre 14.4 y 21.1 °C en la temperatura del aire en contacto con el cuerpo, en Estados Unidos de América, entre 20.5 y 26.7 °C, y en los trópicos, entre 23.3 y 29.4 °C, con humedades relativas de entre 30 % y 70 % [51].

2.4. Parámetros de evaluación

Parámetros ligados al confort lumínico son aquellos que evalúan la calidad luminosa en el entorno construido, están basados en un enfoque estadístico, y se diferencian entre sí por varias características, tales como el alcance de la evaluación, las cantidades físicas implicadas, el periodo de cálculo, la fuente de luz, el criterio de aceptabilidad y la presencia de un umbral. Los diversos parámetros se han desarrollado para evaluar un aspecto específico de confort lumínico, es decir, cantidad de luz, uniformidad de la luz, calidad de la luz y el deslumbramiento. De acuerdo a una posible clasificación los parámetros pueden ser locales o zonales. Un parámetro local varía con la posición proporcionando así un valor para cada punto dentro de un espacio; los parámetros locales se presentan a menudo a través de mapas, que proporcionan una visualización detallada de la magnitud del parámetro sobre todo el espacio. Un parámetro zonal, por otro lado, proporciona un único valor que representa todo el entorno bajo análisis, por ejemplo, una habitación. Los parámetros locales pueden apoyar a los diseñadores en la definición detallada de la forma y la ubicación de las ventanas, tragaluces, mientras que los parámetros zonales son

útiles para comunicarse con los que no son especialistas y responsables del diseño, y ofrecer así, otras técnicas de análisis, por ejemplo, la optimización, análisis de sensibilidad, análisis de incertidumbre, etc. [52].

De acuerdo a la literatura, se utilizan diversos adjetivos o términos para describir el tipo de evaluación que arroja un parámetro de confort lumínico de acuerdo con el tiempo de discretización. Adjetivos como dinámica y estática son utilizados para identificar a los parámetros con los que se basan, respectivamente, en las series de tiempo de los valores de iluminancia, o simplemente involucran una condición climática considerada respectivamente para una situación dada. El enfoque dinámico se adopta para proporcionar un resultado integral para el funcionamiento del edificio y para dar cuenta de las variaciones en cielo y las condiciones del clima y la trayectoria aparente del sol a lo largo del año [36]. Los parámetros dinámicos se pueden dividir en dos categorías: los parámetros de series de tiempo, que proporcionan una serie de medidas instantáneas basadas en los valores por hora en el conjunto de datos del tiempo anual, y los parámetros acumulativos, que predicen las medidas agregadas de la luz del día en un periodo de tiempo [53]. En la analogía con la terminología general adoptada en el ámbito del confort térmico, los parámetros de confort lumínico se evalúan mediante la adopción de los términos de corto plazo y largo plazo. A corto plazo son aquellos parámetros que proporcionan una evaluación instantánea de un entorno de luz dada; a largo plazo son, en cambio, los parámetros que resumen en un solo valor la evaluación de un ambiente de luz dada durante un periodo prolongado de tiempo [52].

Para los criterios de aceptabilidad de los parámetros, la evaluación de un entorno dado se compara con valores reales de una o varias cantidades de iluminación de un entorno físico referente. El criterio de aceptación puede ser desigual o bilateral. Para los parámetros desiguales, un nivel de funcionamiento visual es considerado aceptable cuando la cantidad física es mayor o más pequeña que un valor de referencia. Para los parámetros bilaterales, se establecen dos valores de frontera de manera que solo los casos que caen en el interior (o exterior) sean considerados aceptables. Los parámetros relacionados con el deslumbramiento, reproducción de color y uniformidad de la luz, corresponden principalmente a la categoría de desiguales, ya que su nivel aceptable se asume generalmente para ser simplemente mayor o menor que un umbral definido. Por otro lado, en la categoría de los parámetros bilaterales se adaptan a métricas basadas en iluminancia ya que algunos de ellos consideran si existe iluminancia demasiado

baja, o demasiado alta que puede generar incomodidad visual [38].

Algunos parámetros se acompañan de umbrales, mismos que son útiles para determinar si un ambiente luminoso dado puede ser considerado cómodo. Sin embargo, definir un umbral es complejo, ya que puede depender del fenómeno evaluado, la tarea visual llevada a cabo por los ocupantes, o bien, de la técnica de iluminación utilizada. Generalmente la mayoría de los parámetros basados en los valores de un umbral de iluminancia varían dependiendo de la tarea visual [52].

Parámetros ligados al confort lumínico

Autonomía de la luz natural (DA): es un parámetro de evaluación propuesto en primer lugar por la Association Suisse de Electriciens en 1989 [54] y posteriormente refinado por Reinhart y Walkernhorst [35]; el cual se define como el porcentaje de horas anuales durante el día que un punto dado en un espacio está por encima de un nivel de iluminación especificada tomando en cuenta sólo la iluminación natural,

$$DA = \frac{\sum_i (w f_i \cdot t_i)}{\sum_i t_i} \in [0, 1]$$

$$\text{donde } w f_i = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{Daylight} \geq E_{LL} \\ 0 & \text{si } E_{Daylight} < E_{LL}, \end{cases} \quad (2.6)$$

donde t_i es cada hora ocupada en un año; $w f_i$ es un factor de ponderación que depende de los valores de $E_{Daylight}$ y E_{LL} que son, respectivamente, la iluminancia horizontal en un punto dado debido a la radiación y el valor límite de iluminancia.

Siendo que la definición de DA no se acompaña de un valor de umbral especificado; Olbina *et al.* [55] sugiere establecer el umbral $E_{LL} = 500lx$.

El DA es un índice expresado a largo plazo, y el rendimiento visual se concibe a través de un único valor expresado como un porcentaje. El DA toma en cuenta las condiciones meteorológicas reales del lugar. Sin embargo, de acuerdo con Nabil y Mardaljevic [39], tiene algunas limitaciones: 1) el DA no le da importancia a los valores de iluminancia de la luz que caen por debajo del umbral, pero que pueden ser valorados por los ocupantes y que también pueden reducir las cargas de iluminación eléctricas; 2) no da importancia a los valores de iluminancia de la luz que superan el umbral,

información que podría ser potencialmente una causa de discomfort visual debido a un exceso de luz.

Las ventajas y desventajas del DA son [36]:

Ventajas

- Considera las horas reales de operación y uso del espacio utilizando las condiciones climatológicas de cada lugar (archivos de clima específicos).

Desventajas

- No hay un límite superior establecido en los niveles de iluminación permitidos. Espacios que reciben iluminación directa del sol podrían cubrir sin ninguna dificultad con este parámetro, sin embargo, no se considera el discomfort lumínico por exceso de iluminación.

Autonomía continua de la luz natural (cDA): es un parámetro propuesto por Rogers *et al.* [37], el cual propone una mejora al DA , y a diferencia del DA , el cDA toma en cuenta los valores de iluminación que están por debajo del umbral (E_{LL}).

$$cDA = \frac{\sum_i (w f_i \cdot t_i)}{\sum_i t_i} \in [0, 1]$$

$$\text{donde } w f_i = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{Daylight} \geq E_{LL} \\ \frac{E_{Daylight}}{E_{LL}} & \text{si } E_{Daylight} < E_{LL}, \end{cases} \quad (2.7)$$

Las ventajas y desventajas del cDA son [36]:

Ventajas

- Se puede utilizar como factor para la reducción de cargas de iluminación eléctrica en espacios con suficiente iluminación natural a partir de la definición de los periodos de tiempo en donde se requiere y no utilizar iluminación artificial.

Desventajas

- En comparación con otros parámetros, es menos adecuado para la valoración de posibles diseños, derivado de la dificultad de definir si el resultado responde al porcentaje de veces que el nivel de iluminación se presenta en el espacio, o si el nivel de iluminación permanece durante un porcentaje del tiempo; y tampoco aporta un dato que refiera a una proporción media.

Iluminancia útil por luz natural (UDI): es un parámetro definido por Nabil y Mardaljevic [39] como la fracción de tiempo durante un año cuando la luz natural horizontal del interior ilumina un punto dado que cae en un rango determinado. Los valores límite de iluminancia superior e inferior proponen dividir el periodo analizado en tres valores: El valor superior (UDI_+) que se propone para representar el porcentaje de tiempo cuando existe un exceso de luz natural que podría generar incomodidad visual o carga térmica excesiva; el valor medio (UDI_u) que representa el porcentaje de tiempo con el nivel de iluminación adecuado; y el valor inferior (UDI_-) que representa el porcentaje de tiempo cuando el nivel de iluminación es demasiado bajo.

$$UDI = \frac{\sum_i (wf_i \cdot t_i)}{\sum_i t_i} \in [0, 1] \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} UDI_+ & \text{donde } wf_i = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{\text{Daylight}} > E_{UL}, \\ 0 & \text{si } E_{\text{Daylight}} \leq E_{UL}, \end{cases} \\ UDI_u & \text{donde } wf_i = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{LL} \leq E_{\text{Daylight}} \leq E_{UL}, \\ 0 & \text{si } E_{\text{Daylight}} < E_{LL} \text{ y } E_{\text{Daylight}} > E_{UL}, \end{cases} \\ UDI_- & \text{donde } wf_i = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{\text{Daylight}} < E_{LL}, \\ 0 & \text{si } E_{\text{Daylight}} \geq E_{LL}, \end{cases} \end{cases}$$

donde E_{UL} es el límite superior de iluminancia, y E_{LL} es el límite inferior de iluminancia. El UDI es un parámetro a largo plazo, local y bilateral que mide la cantidad de luz natural. Según Nabil *et al.* [39], el UDI aporta información no sólo de los niveles útiles de iluminancia de luz natural, sino también de la frecuencia de ocurrencia de los niveles excesivos de la luz natural que podrían causar malestar al usuario, niveles indicados en la Tabla 2.2 de acuerdo a varios autores, en donde proponen un rango entre los límites inferiores de iluminancia E_{LL} , y los límites superiores de iluminancia E_{UL} .

Las ventajas y desventajas del uso del UDI son [36,39]:

Ventajas

- Considera la mayoría de las ventajas del DA , y adicionalmente, favorece la evaluación por deslumbramiento y el discomfort lumínico al considerar los excesos de iluminación.

Tabla 2.2: Valores límite de iluminancia en UDI para los límites inferiores de iluminancia E_{LL} , y los límites superiores de iluminancia E_{UL} de acuerdo a varios autores.

Fuente	E_{LL} (lx)	E_{UL} (lx)
Nabil y Mardajevic [39]	100	2000
Mardajevic y Heschong [53]	100	2500
Olbina y Beliveau [55]	500	2000
David y Donn [56]	300	8000
Sicurella y Evola y Wurtz [33]	150	750

- Favorece la comparación de los niveles útiles de iluminación por luz natural entre dos o más variantes de diseño de espacios.
- Proporciona tres valores para cada punto del espacio.

Desventajas

- Dado que se evalúan tres valores distintos (tres puntos de datos para cada punto del espacio), es difícil evaluar el desempeño a simple vista o comunicar el desempeño del espacio a alguien que no es especialista.
- No existe un acuerdo completo sobre los valores límite de iluminancia, como se puede ver en la propuesta de varios autores en la Tabla 2.2.

Frecuencia de confort visual (FCV): es un parámetro definido por Sicurella *et al.* [33] como el promedio del porcentaje del tiempo durante el cual la luz natural se encuentra en el rango de valores apropiados de iluminancia para un periodo de tiempo en una superficie definida. La FCV es un índice a largo plazo, zonal y bilateral. Se considera que si la iluminancia promedio se mantiene en el intervalo entre dos valores de umbral, entonces el confort visual está garantizado gracias a la iluminación natural. La FCV se puede definir en función del UDI_u como:

$$FCV = \langle UDI_u \rangle, \quad (2.9)$$

donde $\langle UDI_u \rangle$ se refiere al promedio de todos los puntos para el mapa de porcentajes obtenidos para el UDI_u .

Las ventajas y desventajas del uso de la FCV son [52]:

Ventajas

- FCV es útil para comparar la eficacia visual global de las diferentes soluciones y sistemas.

Desventajas

- El concepto detrás de la definición de FCV es similar al de UDI , pero los valores de los límites inferiores de iluminancia E_{LL} , y los límites superiores de iluminancia E_{UL} son diferentes en cuanto a lo que proponen Nabil y Mardaljevic [39], es decir $2000 lx$ y $100 lx$, respectivamente. Estos valores fueron propuestos muy probablemente por el trabajo de Sicurella *et al.* [33], quien establece el rango de E_{LL} en $150 lx$ y E_{UL} en $750 lx$. Sin embargo estos rangos debieran estar relacionados con el tipo de actividad según los espacios a evaluar, aún los propuestos por Sicurella *et al.* [33] se diferencian de los rangos establecidos en la NOM-025-STPS-2008 [8] para los niveles mínimos de iluminación relacionados con las áreas de trabajo y la tarea visual del puesto de trabajo, en donde el rango en niveles mínimos de iluminación requeridos va de los $20 lx$ para espacios exteriores hasta $2,000 lx$ en áreas de trabajo para proceso de gran exactitud.

Parámetros ligados al desempeño térmico

El Factor de Decremento (FD): es un parámetro que indica el amortiguamiento de la amplitud de la oscilación de la temperatura del aire interior con respecto a la temperatura exterior [57]. El FD evalúa el desempeño térmico de toda la envolvente. Este parámetro está definido como:

$$FD = \frac{T_{int_{max}} - T_{int_{min}}}{T_{ext_{max}} - T_{ext_{min}}}, \quad (2.10)$$

donde $T_{int_{max}}$ y $T_{int_{min}}$ son las temperaturas del aire interior [$^{\circ}C$] máxima y mínima respectivamente durante un día, mientras que $T_{ext_{max}}$ y $T_{ext_{min}}$ son las temperaturas exteriores máximas y mínimas respectivamente durante el mismo día. Generalmente entre más pequeño el FD , mejor será el

desempeño térmico. Este parámetro se utiliza cuando no se usa aire acondicionado. El FD está relacionado con la transferencia de calor al interior de la zona que se está analizando, por lo que si el FD se hace más pequeño, quiere decir que la cantidad de energía que ha entrado y salido al espacio se ha reducido y viceversa.

2.5. Metodología para la evaluación del desempeño lumínico y térmico

De los parámetros de evaluación para el confort lumínico descritos en este capítulo, se decide utilizar el *nivel útil de iluminación por luz natural (UDI)* para la evaluación de las simulaciones a realizar, ya que es un parámetro que considera la mayoría de las ventajas del DA , y adicionalmente, favorece la evaluación por deslumbramiento que considera la sobre iluminación, y que a su vez la radiación incidente podría causar discomfort térmico. Para el desempeño térmico, se decide utilizar el Factor de Decremento FD .

Además con el fin de complementar el análisis de los espacios, se propone una metodología que consiste en combinar dos de los parámetros descritos en este capítulo (Frecuencia de confort visual FCV y Factor de decremento FD) para evaluar la interacción entre la cantidad de luz que ingresa a un espacio y el desempeño térmico. La propuesta es conforme el diagrama mostrado en la Figura 2.5, del cuál se pueden identificar cuatro zonas:

- Zona 1: Baja frecuencia de confort visual y un bajo factor de decremento
- Zona 2: Baja frecuencia de confort visual y un alto factor de decremento
- Zona 3: Alta frecuencia de confort visual y un bajo factor de decremento
- Zona 4: Alta frecuencia de confort visual y un alto factor de decremento

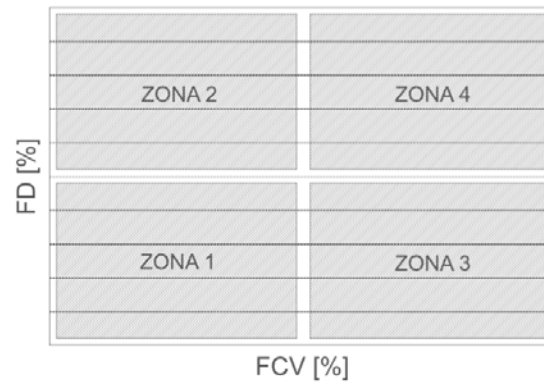


Figura 2.5: Diagrama de evaluación para el confort lumínico y el desempeño térmico utilizando el Factor de Decremento (FD), Frecuencia de Confort Visual (FCV), Zona 1: baja frecuencia de confort visual y un bajo factor de decremento; Zona 2: baja frecuencia de confort visual y un alto factor de decremento; Zona 3: alta frecuencia de confort visual y un bajo factor de decremento; Zona 4: alta frecuencia de confort visual y un alto factor de decremento.

Siendo la Zona 3, alta frecuencia de confort visual y un bajo factor de decremento, la más favorable para poder considerar que el espacio tiene un adecuado desempeño lumínico y térmico.

El objetivo de la combinación de los parámetros es ayudar a visualizar si una estrategia mejora o no, tanto el confort lumínico como el desempeño térmico; por ejemplo, aportar información acerca de la FCV y el FD con el fin de mejorar las horas del confort lumínico y desempeño térmico al interior del espacio y sobre el área de trabajo.

Capítulo 3

Validación del uso de OpenStudio

En este capítulo se presenta el proceso de validación de OpenStudio como interfaz del programa Radiance utilizado para las simulaciones generadas en esta tesis. Se realiza una comparación cualitativa para dos casos. El primer caso compara los resultados de una simulación reportada previamente en la literatura por Christian *et al.* [29], la cual evalúa el nivel de iluminación a lo largo de una línea central sobre la superficie de un espacio y los resultados de generar una simulación equivalente a la reportada en la literatura, a partir de la representación digital del espacio conforme las características y parámetros reportados. El segundo caso compara los resultados de mediciones experimentales, las cuales evalúan el nivel de iluminación en un punto fijo de un espacio existente a lo largo de 12 horas y los resultados de generar una simulación equivalente a partir de la representación digital del espacio conforme las características y parámetros físicos existentes. Estas mediciones se comparan con valores numéricos obtenidos usando OpenStudio y Radiance.

3.1. Caso uno

En el caso uno se simula la iluminación natural del espacio mostrado en la Figura 3.1 (a), con una ventana al sur con un cristal claro de 3 mm y con las dimensiones especificadas en la Figura 3.1 (a). La simulación

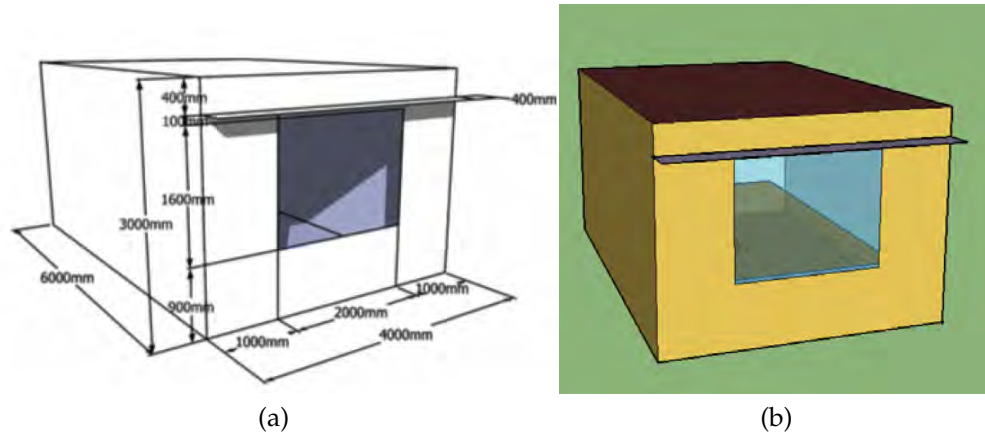


Figura 3.1: Esquema y dimensiones del espacio simulado en el caso uno (a) representación digital del espacio usado por Christian *et al.* [29], (b) representación digital del espacio en SketchUp con la conexión para OpenStudio.

realizada por Christian *et al.* [29] corresponde al día 21 de septiembre (día 265 juliano) del año 2008 a las 15:00 horas en Dinamarca. El archivo de clima utilizado por Christian *et al.* [29] fue de un año típico de Dinamarca. En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros utilizados para la simulación.

Para reproducir la simulación y validar el uso de OpenStudio, se representó digitalmente el espacio en SketchUp utilizando la conexión para OpenStudio como se observa en la Figura 3.1 (b), y se tomaron como referencia los parámetros definidos en la tabla 3.1. Ya que no se tuvieron disponibles los mismos datos de clima (archivo de clima) usados en la simulación por Christian *et al.* [29], el archivo de clima que se utilizó fue descargado del sitio web de EnergyPlus Weather Data by Region [58], para la Europe WMO Region 6 - Denmark - Copenhagen, año 2009, un año típico de Dinamarca.

Como se ve en la Figura 3.2 existe un comportamiento diferente entre la simulación realizada por Christian *et al.* [29] que mide la distribución de iluminancia sobre una línea central a una altura de 0.75 m al interior del espacio para el 21 de septiembre (día 265 juliano) a las 15:00 horas del año 2008 usando un archivo de clima de un año típico de Dinamarca; en comparación con los resultados obtenidos de la simulación con OpenStudio para el 21 de septiembre (día 265 juliano) a las 15:00 horas usando el

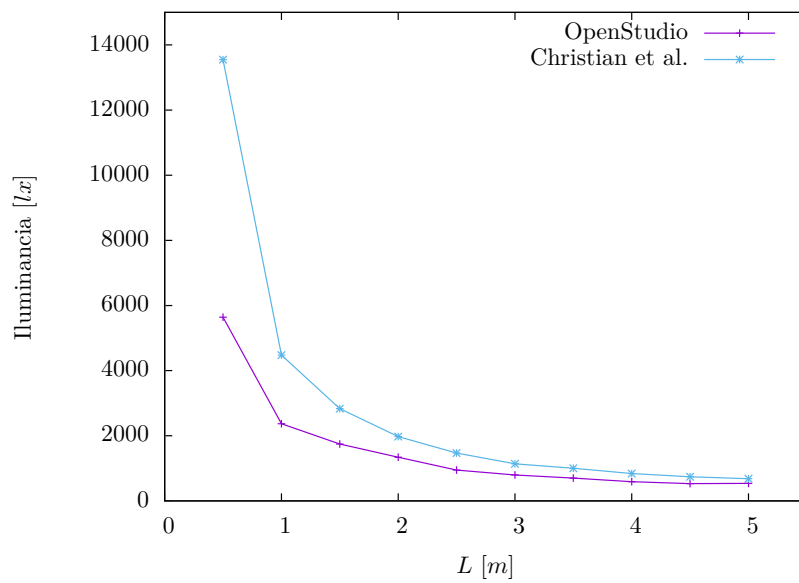


Figura 3.2: Comparación entre la iluminancia reportada por Christian *et al.* [29] para el día 12 de septiembre (265 juliano) a las 15:00 del año 2008, y la simulada usando OpenStudio para el 12 de septiembre (día 265 juliano) a las 15:00 horas de un año típico de Dinamarca a lo largo de una línea central sobre la superficie de un espacio.

Tabla 3.1: Parámetros de simulación usados por Christian *et al.* [29]

Dimensiones del espacio	Alto x ancho x profundidad	3 m x 4 m x 6 m
Cristal (ventana)	Alto x ancho	1.6 m x 2 m
	Separación	0.9 m del piso
	Transmitancia	0.785
Reflectancia difusa	Muros	0.7
	Techo	0.8
	Piso	0.3
	Cristal	0.215
Ajustes de cálculo	Tamaño de malla	0.5 m x 0.5 m
Puntos de medición	11 puntos a lo largo de la línea central del espacio con intervalos a cada medio metro	
Modelo de cielo	Cielo anisotrópico de Perez	
Rebotes ambientales		7
División del ambiente		4096
Muestreo ambiental		62048
Umbral		0.03

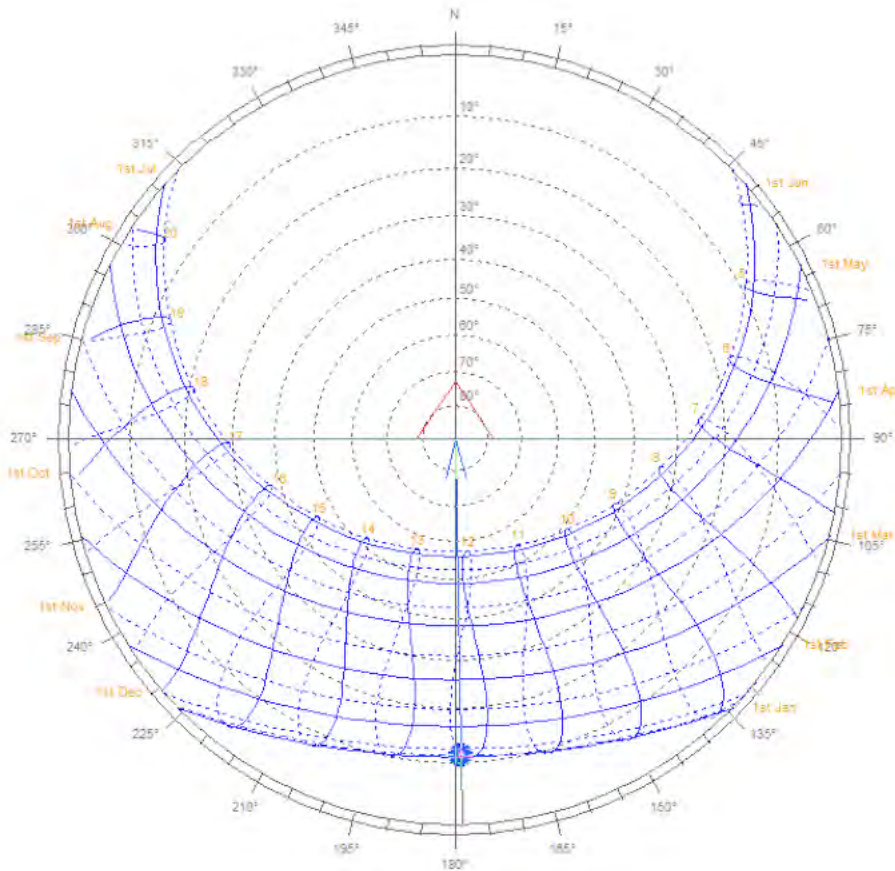


Figura 3.3: Gráfica Estereográfica correspondiente a Dinamarca. Coordenadas $55^{\circ}40'34''N$ $12^{\circ}34'08''E$.

archivo de clima de un año típico de Dinamarca, descargado del sitio web de EnergyPlus. Dinamarca se localiza bajo las coordenadas $55^{\circ}40'34''N$ $12^{\circ}34'08''E$, la gráfica estereográfica correspondiente es la que se observa en la Figura 3.3.

Se estima que la variación en los resultados pudo deberse a la diferencia entre el archivo de clima descargado del sitio web de EnergyPlus y el utilizado por Christian *et al.* [29], ya que no se tiene la seguridad de haber utilizado los mismos datos, y posiblemente a una diferencia horaria de una (1) hora por ajuste de acuerdo al horario de verano; por lo que se graficó la iluminancia a lo largo del cuarto, cinco días antes y cinco días después

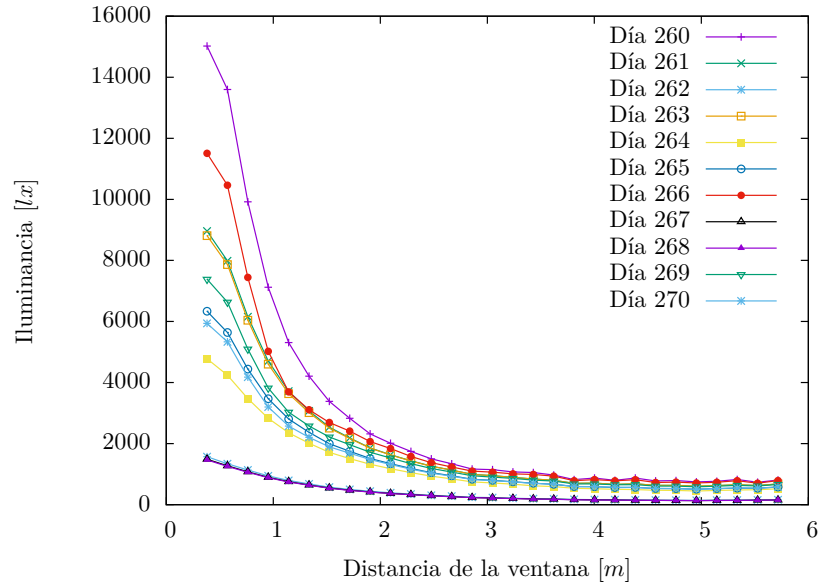


Figura 3.4: Iluminancia lo largo de una línea central sobre la superficie de un espacio, durante once días diferentes, +/- 5 días a partir del 12 de septiembre (día 265 juliano) a las 14:00 horas de un año típico de Dinamarca, utilizando el archivo de clima descargado del sitio web de EnergyPlus [58].

del 12 de septiembre (día 265 juliano) a las 14:00 horas como puede verse en la Figura 3.4. Comparando los resultados reportados por Christian *et al.* [29] del día 12 de septiembre (día 265 juliano) a las 15:00 horas, con los resultados de la simulación en OpenStudio, el día que más se acercó corresponde al 16 de septiembre (día 260 juliano) a las 14:00 horas como puede observarse en la Figura 3.5. Siendo una comparación cualitativa con el objetivo de validar el uso de OpenStudio, únicamente se sobrepusieron los resultados, sin llegar a considerar un error relativo.

3.2. Caso dos

Con el objetivo de poder simular el comportamiento de la iluminación natural al exterior tomando en cuenta las sombras generadas por los elementos colindantes, en el caso dos, se midieron los niveles de iluminación en un punto sobre el tubo solar de la oficina de dirección del Instituto de

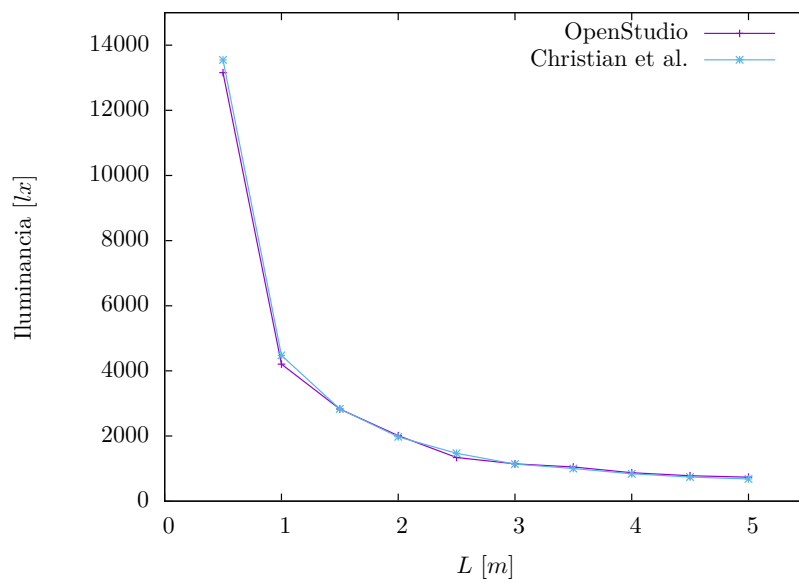


Figura 3.5: Comparación entre la iluminancia reportada por Christian *et al.* [29] para el día 21 de septiembre (265 juliano) a las 15:00 del año 2008, y la simulada en OpenStudio para el 16 de septiembre (día 260 juliano) a las 14:00 horas de un año típico de Dinamarca, 2009.



Figura 3.6: Equipo para realizar las mediciones experimentales de los niveles de iluminación en la superficie exterior de un tubo solar.

Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM), como se observa en la Figura 3.6.

El IER-UNAM se encuentra en Temixco Morelos, México, bajo las coordenadas $18^{\circ}51'16''N$ $99^{\circ}13'38''O$, la gráfica estereográfica correspondiente es la que se observa en la Figura 3.7. Las mediciones se realizaron el 27 de mayo (147 juliano) del año 2015, cada media hora de las 7:00 a las 19:00. El equipo de medición que se utilizó fue un luxómetro AEMC modelo CA813, con una precisión de $\pm 11\%$ de la lectura según fabricante [59]. De manera simultánea se llevó a cabo un registro del sombreado tomando fotografías cada hora como se ve en la Figura 3.8.

Se realizó un levantamiento de las dimensiones de la oficina de dirección y los espacios colindantes como se observa en la Figura 3.9, a partir del cual se generó la representación digital del espacio en SketchUp utilizando la conexión para OpenStudio como se aprecia en la Figura 3.10.

Para realizar una comparativa de la representación digital del espacio con el registro fotográfico como se observa en la Figura 3.11, se utilizó la herramienta de sombras en SketchUp en la cual se definió el día del experimento y la corrección horaria correspondiente. El comportamiento de las sombras generadas en SketchUp por los edificios colindantes fue el mismo, como se aprecia en la Figura 3.11. La corrección horaria utilizada para estas simulaciones, misma que se usará en el resto de la tesis, se generó conforme lo establecido por Duffie *et al.* [60] como corrección de Tiempo Solar basado en el movimiento angular aparente del sol al medio día cuando el

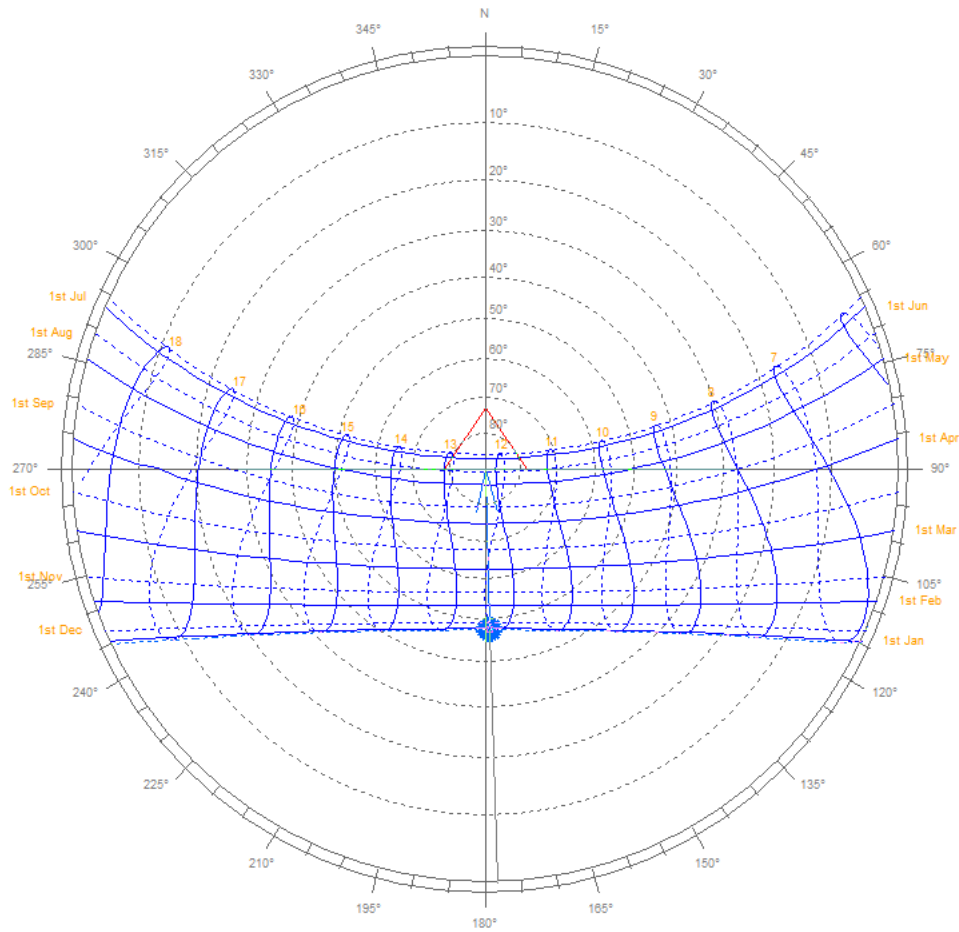


Figura 3.7: Gráfica Estereográfica correspondiente a Temixco Morelos, México. Coordenadas $18^{\circ}51'16''\text{N}$ $99^{\circ}13'38''\text{O}$



Figura 3.8: Registro fotográfico del sombreado en la azotea de la oficina de dirección en el IER-UNAM cada hora para el día 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015.

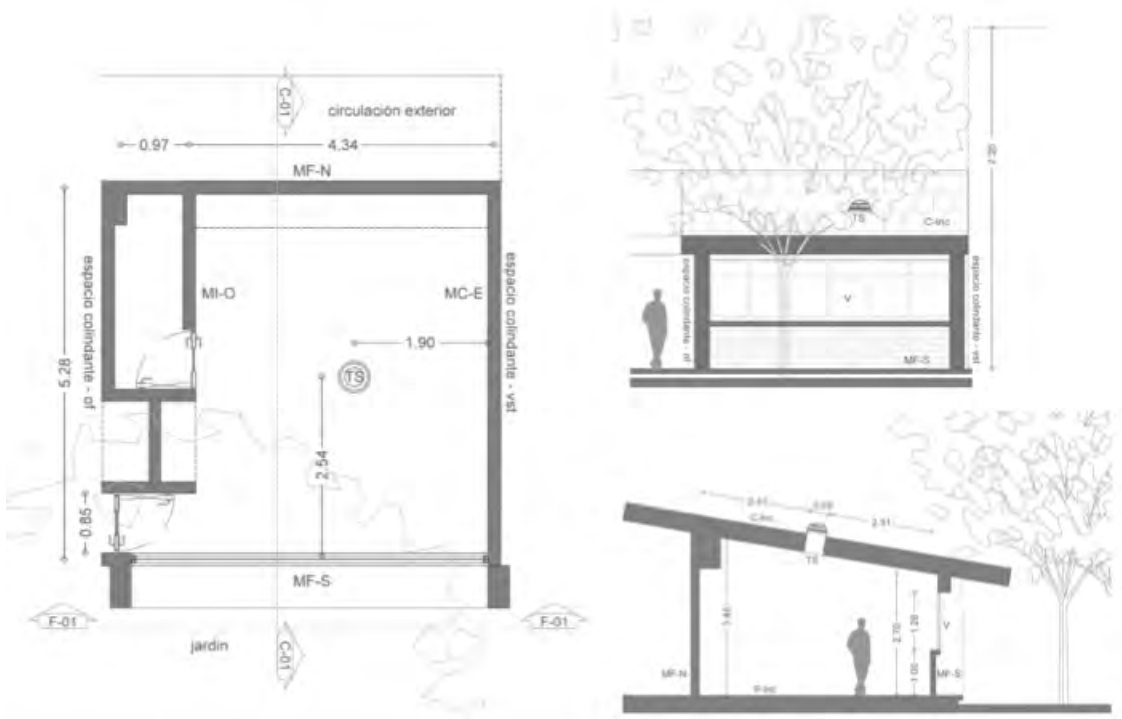


Figura 3.9: Dimensiones de la oficina de dirección del IER-UNAM. Cotas en metros.

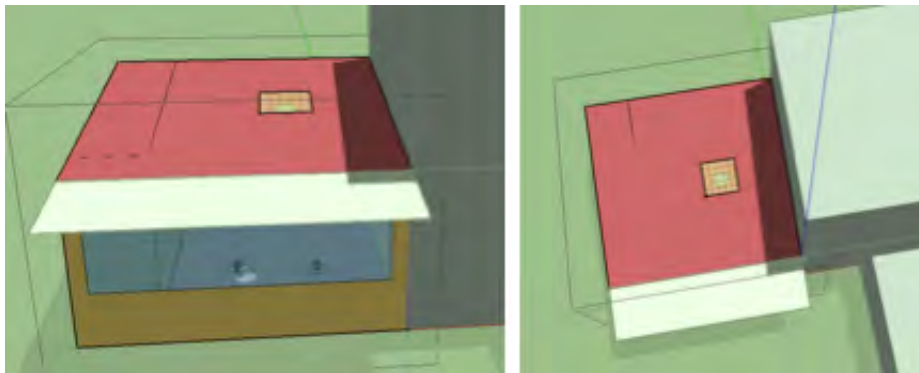


Figura 3.10: Representación digital del espacio en SketchUp de acuerdo a las dimensiones de la oficina de dirección del IER-UNAM con tubo solar en la azotea.



Figura 3.11: Comparación a las 11:00 horas del día 27 de mayo del 2015, del sombreado entre el modelo simulado y el registro fotográfico de la azotea de la oficina de dirección en el IER-UNAM.

sol cruza el meridiano del observador.

Para la simulación se colocó una malla, para medir los niveles de iluminación, de $1m \times 1m$ arriba del tubo solar con una separación de $0.5m$. El archivo de clima que se utilizó para la simulación corresponde al año típico de Temixco, Morelos, el cuál se editó con los datos reportados por la estación meteorológica del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015. Se realizó una simulación sin tomar en cuenta el sombreado por los árboles circundantes y se comparó con las mediciones experimentales. De la malla, se sacó el valor de iluminancia del punto central y se comparó con las mediciones experimentales como se observa en la Figura 3.12, teniendo un comportamiento similar de los niveles de iluminación para un punto sobre el tubo solar. El error relativo máximo es del 61 % como puede observarse en la Figura 3.13 presentándose al medio día.

De acuerdo a la Figura 3.10 la representación digital del espacio de la oficina de dirección en el IER-UNAM no considera la presencia del árbol existente frente a la fachada sur. A partir de la variación que se presentó entre los resultados de la simulación y los registros de las mediciones experimentales se decidió agregar el árbol al modelo. Se consideró el trabajo realizado por Simá *et al.* [61] como referencia y se utilizaron las herramientas de sombra para generar el volumen que representa el árbol como se observa en la Figura 3.14 igualando las sombras generadas en cubierta de acuerdo al registro fotográfico que se muestra en la Figura 3.8.

Los resultados de la simulación con el árbol modelado, presentan una mejora en la comparación con las mediciones experimentales, principal-

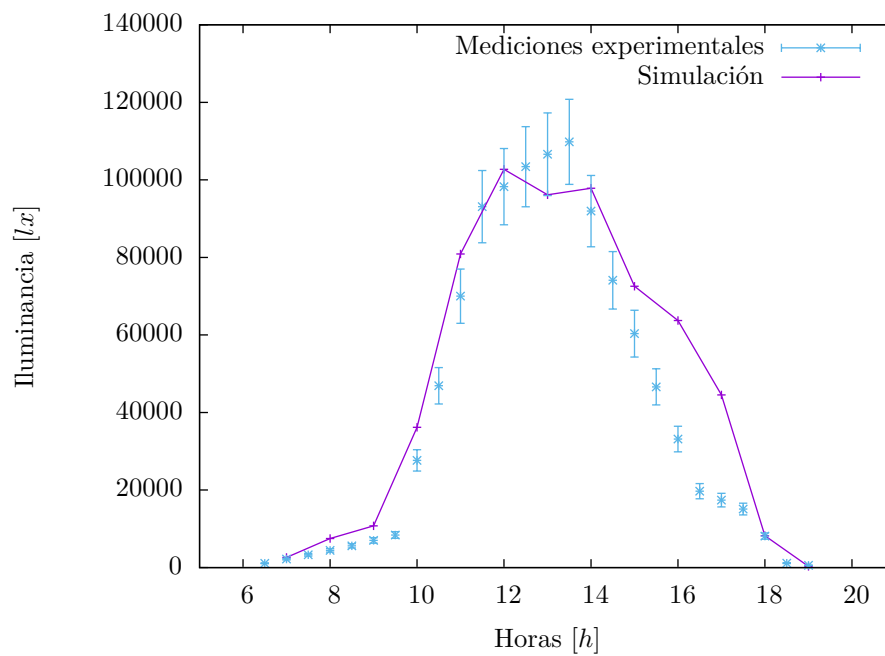


Figura 3.12: Niveles de iluminación medidos y simulados sobre la cubierta de la oficina de dirección del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015 sin tomar en cuenta el árbol.

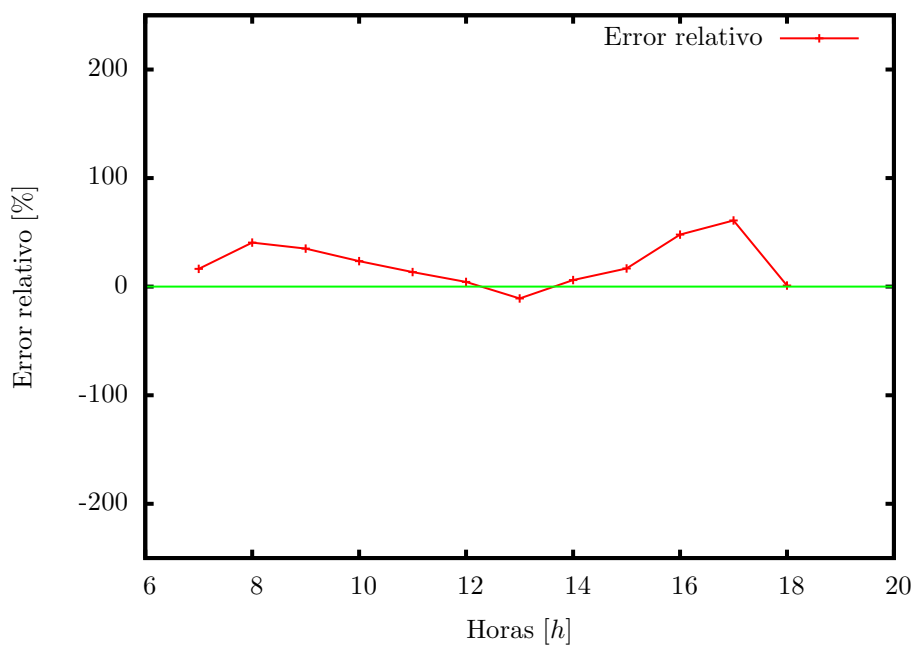


Figura 3.13: Error relativo de la comparación de los niveles de iluminación medidos y simulados en un punto sobre el tubo solar instalado en la cubierta de la oficina de dirección del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015, de las 7:00 a las 19:00 horas sin tomar en cuenta el árbol.



Figura 3.14: Representación digital del espacio en SketchUp de acuerdo a las dimensiones de la oficina de dirección del IER-UNAM con tubo solar en la cubierta, considerando el árbol existente frente a la fachada sur.

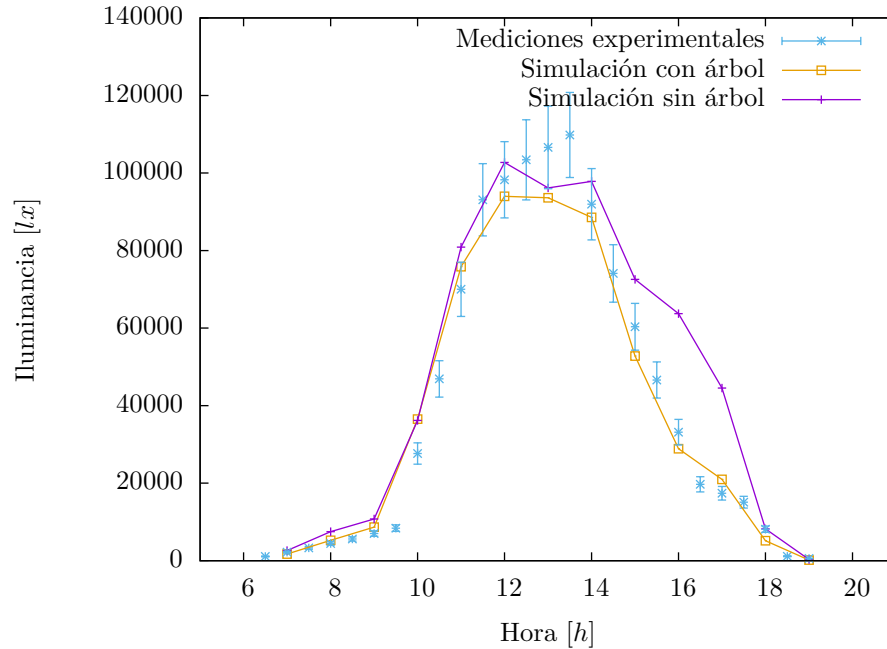


Figura 3.15: Niveles de iluminación medidos y simulados en un punto sobre el tubo solar instalado en la cubierta de la oficina de dirección del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015. Resultados de la simulación del modelo sin árbol y el modelo con árbol.

mente de las 14:00 a las 18:00, según las condiciones de sombreado generadas por el árbol como se aprecia en la Figura 3.15. El error relativo máximo es de -57% como se muestra en la Figura 3.16, y la mejora en la simulación con árbol se aprecia también en el error relativo, de las 8:00 a las 17:00 horas, a pesar del aumento en el error relativo en las últimas dos horas.

3.3. Conclusiones

En este capítulo se validó el uso de OpenStudio, utilizado para las simulaciones de esta tesis, por medio de comparaciones cualitativas de dos casos: un caso numérico, donde se reprodujo una simulación de un espacio previamente analizado comparando la iluminancia a lo largo de una

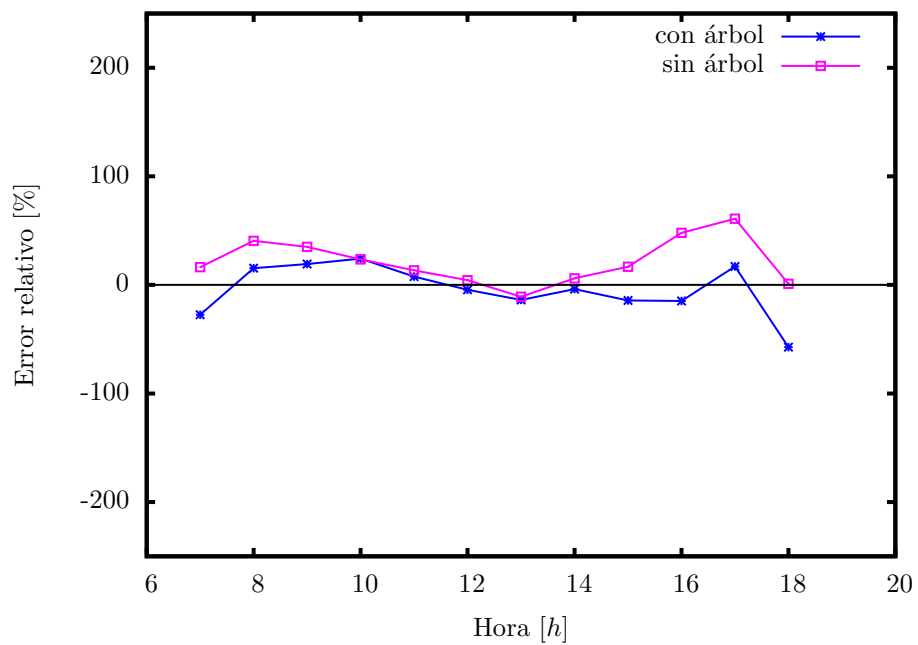


Figura 3.16: Error relativo de la comparación de los niveles de iluminancia medidos y simulados sobre un tubo solar instalado en la cubierta de la oficina de dirección del IER-UNAM para el 27 de mayo (día 147 juliano) del año 2015. Simulación sin árbol y con árbol.

línea central sobre la superficie de un espacio; y el otro caso experimental, donde se representó digitalmente y se simuló un espacio existente en el IER comparando los niveles de iluminación en un punto fijo al exterior, sobre un tubo solar instalado en la cubierta. En la comparación del caso uno, se encontró una variación en los resultados con base en una hora de diferencia (entre las 14:00 y 15:00 horas) y 5 días (del día 260 juliano al 265 juliano). El comportamiento de los resultados a lo largo de la línea central del espacio es muy similar. En la comparación del caso dos, utilizando mediciones experimentales, se encontró un error relativo promedio de 21 % sin considerar el árbol y de 5 % considerando el árbol.

De acuerdo a los resultados obtenidos en ambos casos, se determina que el uso de OpenStudio como interfaz de Radiance es válido para reproducir el comportamiento de la iluminación natural al interior de los espacios. Para el caso uno, las variaciones en los resultados se deben a que no se tiene la certeza de haber utilizado el mismo archivo de clima. Para el caso dos, la variaciones en los resultados se deben a la limitación que presenta OpenStudio para reconocer formas no rectangulares además de elementos de sombra como los árboles.

Capítulo 4

Evaluación de la iluminación natural y el desempeño térmico

En la oficina de la dirección del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) fue instalado en la cubierta un tubo solar que permite la entrada de radiación solar directa, causando discomfort lumínico y térmico. En este capítulo se estudian el desempeño lumínico y el desempeño térmico de la oficina de la dirección en su estado actual y tres propuestas. La primera propuesta consiste en simular la oficina de la dirección del IER-UNAM sin la presencia del tubo solar en la cubierta; la segunda propuesta consiste en colocar un vidrio que convierta el 100 % de la radiación transmitida en luz difusa (vidrio difuso); y la tercera propuesta consiste en colocar el vidrio difuso y aumentar la altura del tubo solar para evitar el sombreado de los árboles vecinos para ganar iluminación. Los cuatro casos son simulados y se evalúa el desempeño lumínico y térmico utilizando el UDI (iluminancia útil por luz natural) y la metodología presentada en la sección 2.5. En la sección 4.1 se presentan los antecedentes y las características del espacio existente seleccionado como caso de estudio. En la sección 4.2 se definen los cuatro casos simulados. En la sección 4.3 se presentan los resultados de cada una de las simulaciones, el desempeño lumínico y el desempeño térmico.

4.1. Antecedentes

La oficina de la dirección del IER-UNAM, es un espacio con un área de 22 m^2 que se encuentra inmerso en un bloque de oficinas de una sola planta. Como se observa en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 correspondientes a la planta, corte y fachada respectivamente de la oficina de la dirección, el espacio está confinado por cuatro muros: muro fachada norte (MF-N), muro fachada sur (MF-S) con ventana (V) de 5 m de largo con una altura de 1.28 m y desplantada a 1 m ; muro interior oeste (MI-O), y muro colindante este (MC-E); un piso (P-Int), y una cubierta inclinada (C-Inc). Al norte colinda con una circulación semi-exterior (pasillo cubierto), al sur con un jardín, al este con un vestíbulo-área de transición con una altura de 7.2 m , y al oeste con una oficina. Frente a la fachada sur, se ubica un árbol con un diámetro de copa aproximado de 11 m y una altura superior a los 10 m . En la cubierta se encuentra instalado un tubo solar (TS) como se observa en la Figura 4.4, con la finalidad de dotar de iluminación natural al interior del espacio. El tubo solar instalado en la cubierta de la oficina de la dirección del IER-UNAM permite la entrada de radiación solar directa al interior, generando marcas de luz en forma de cruz sobre el piso, los muros, y la zona de trabajo a lo largo del día, como se muestra en la Figura 4.5. Estas marcas provocan discomfort lumínico y térmico. Para caracterizar el comportamiento de las marcas de luz, se realizaron mediciones simultáneas en distintos puntos. Se trazó una circunferencia, tomando como centro de la misma el cruce generado por las líneas de luz, y se estableció el radio a partir de la distancia de dicho centro a uno de los extremos de las líneas en donde se localiza la marca resultado de una incidencia mayor de luz, como se observa en la Figura 4.6.

Las mediciones fueron realizadas el día 163 juliano del año 2015 a las $13:00 \text{ h}$. Como se observa en la Figura 4.7 se definieron 5 puntos de medición en donde se registraron los niveles de iluminación para cada uno; en el punto A se midieron 743 lx , en el punto B 1466 lx , en el punto D 1223 lx , en el punto C 97 lx y en el punto E 178 lx ; presentando así una diferencia de hasta 1210 lx en menos de 60 cm sobre la circunferencia.

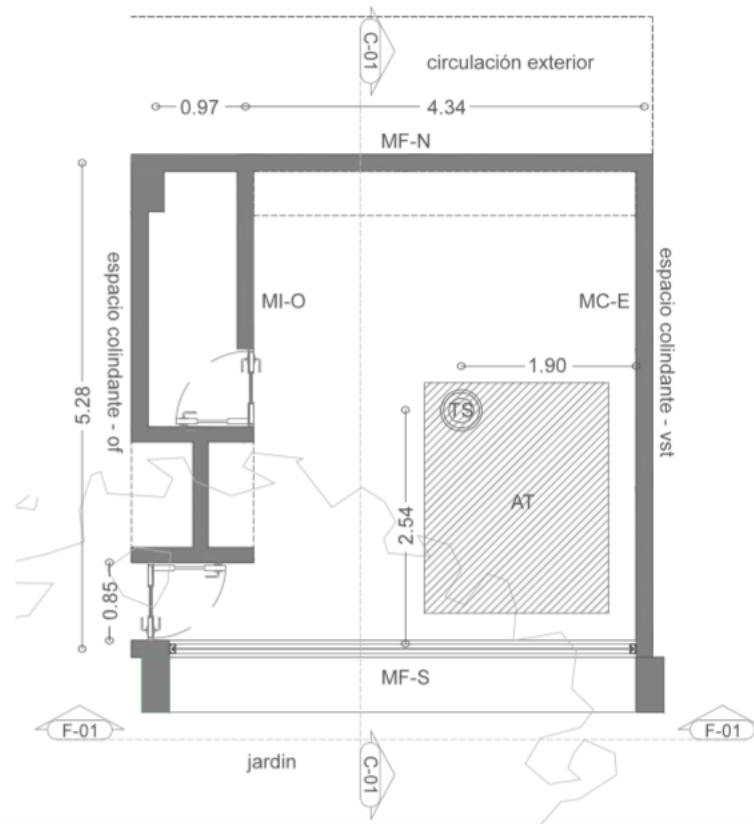


Figura 4.1: Planta de la oficina de la dirección del IER-UNAM, donde TS es la proyección de la ubicación del tubo solar en la cubierta, MF-S es muro fachada sur, MF-N es muro fachada norte, MC-E muro interior este, y MI-O es muro interior oeste, AT es el área de trabajo. C-01 indica proyección de Corte y F-01 proyección de fachada. Las cotas están en metros.

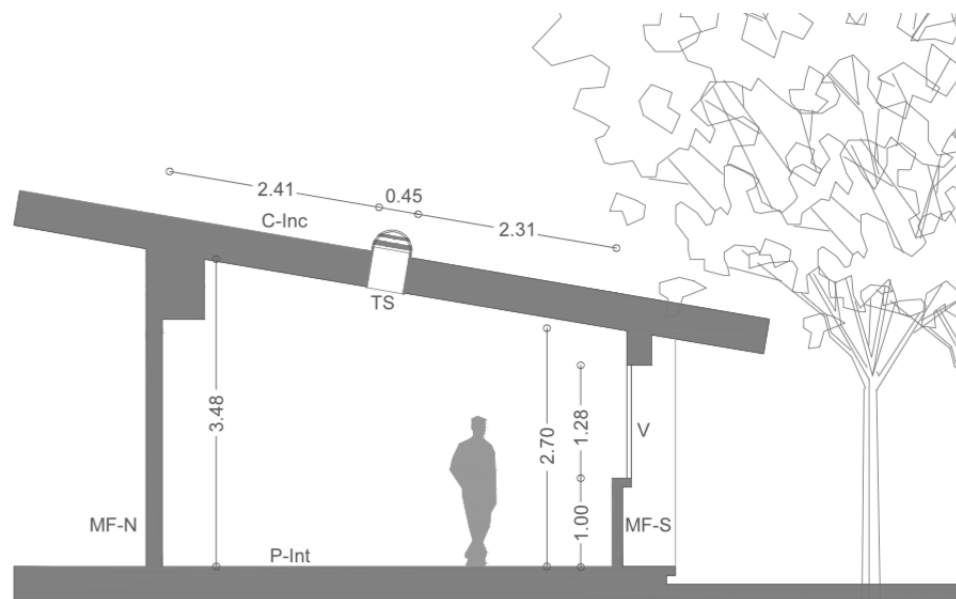


Figura 4.2: Corte (C-01) de la oficina de la dirección del IER-UNAM, donde TS es el tubo solar en la cubierta, V es ventana, MF-S es muro fachada sur, MF-N es muro fachada norte, C-Inc es cubierta inclinada, y P-Int es piso interior. Las cotas están en metros.



Figura 4.3: Fachada (F-01) de la oficina de la dirección del IER-UNAM, donde TS es el tubo solar en la cubierta, V es ventana, MF-S es muro fachada sur, y C-Inc es cubierta inclinada. Las cotas están en metros.



Figura 4.4: Tubo solar (TS) instalado en la cubierta de la oficina de la dirección del IER-UNAM.

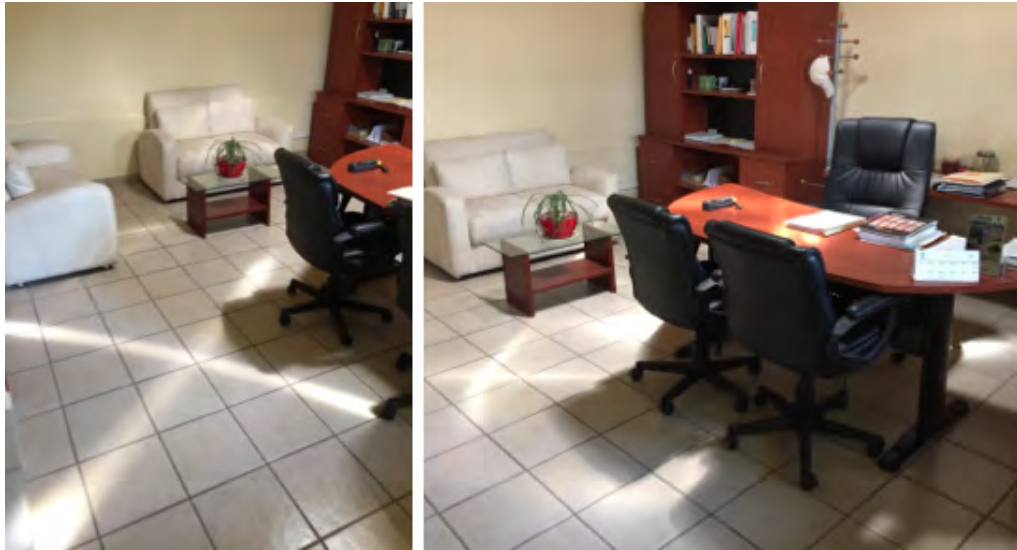


Figura 4.5: Marcas en forma de cruz al interior de la oficina de la dirección del IER-UNAM, debido al tubo solar instalado en la cubierta.

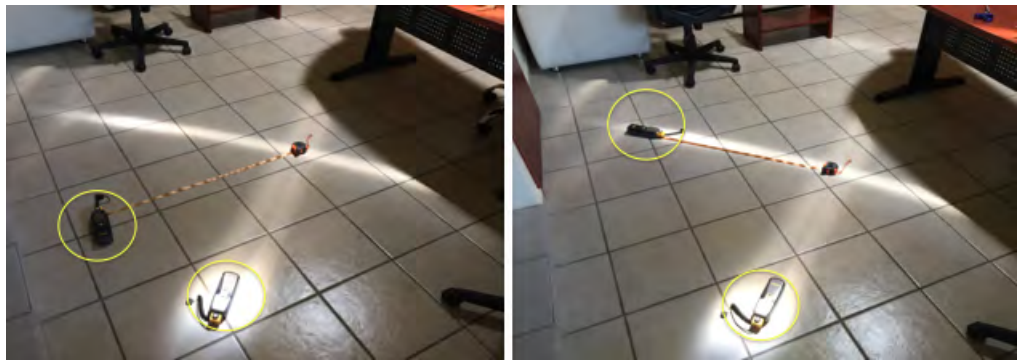


Figura 4.6: Medición de la iluminancia en marcas con mayor incidencia y en diversos puntos circundantes a partir un centro generado por la cruz.

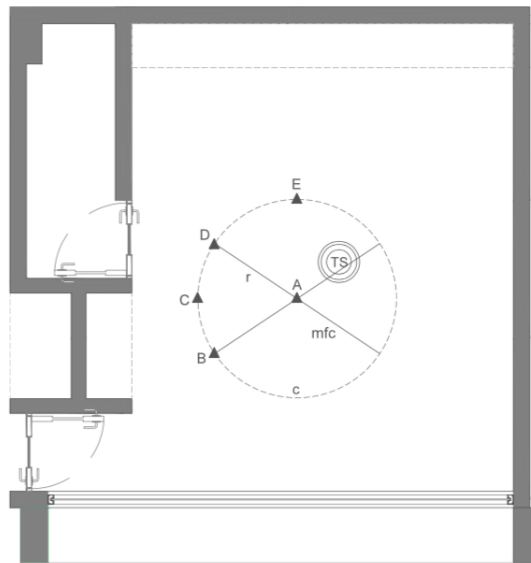


Figura 4.7: Niveles de iluminación al interior de la oficina de la dirección del IER-UNAM a las 13:00 h en diversos puntos de la circunferencia, en donde TS es la proyección del la ubicación del tubo solar en la cubierta, mfc es la marca en forma de cruz, r es el radio de la circunferencia, y c es la circunferencia. La iluminancia en los puntos de medición es $A = 743 \text{ lx}$, $B = 1466 \text{ lx}$, $C = 97 \text{ lx}$, $D = 1223 \text{ lx}$, $E = 178 \text{ lx}$.

4.2. Casos de estudio

Se simula la oficina de la dirección del IER-UNAM de acuerdo a las dimensiones y características presentadas en el levantamiento de las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3. Las simulaciones se realizan usando Radiance y EnergyPlus tomando en cuenta la ventana existente en la fachada sur y el tubo solar en la cubierta inclinada, se consideran los edificios colindantes y los árboles existentes como elementos de sombreado. La orientación corresponde a la existente (6° norte). De acuerdo a las características de los elementos constructivos (muros, piso y cubierta) se definen cuatro sistemas constructivos descritos en la Tabla 4.1: sistema constructivo de muro (SCM), sistema constructivo de muro interior (SCMI), sistema constructivo de piso (SCP), y sistema constructivo de cubierta (SCC), el cual consiste en un sistema de vigueta y bovedilla, en donde la bovedilla es de block hueco de concreto, por lo que para el modelo se consideran tres capas: la primera capa de concreto; la segunda capa como aire, modelada como sólido, siendo una capa homogénea con las propiedades térmicas del aire, y tomando en cuenta solo la transferencia de calor por conducción, siendo que se considera como una simplificación y se esperaría que estuviera subdimensionada la transferencia de calor; al utilizar esta simplificación la transferencia de calor será diferente al caso real, por lo que no se espera que los resultados de desempeño térmico al interior sean los correspondientes al de la oficina pero, dado que se analiza el impacto de los sistemas de iluminación en el desempeño térmico utilizando el FD , cualquier cambio en el FD está relacionado con los cambios en los casos propuestos de iluminación; y la tercera capa de concreto, como se observa en la Figura 4.8.

Para la simulación en EnergyPlus, no se consideran cargas térmicas por iluminación artificial, personas, equipos eléctricos e infiltración. Las propiedades térmicas de los materiales (conductividad térmica, densidad y calor específico) utilizadas en los SC, se definen en la Tabla 4.2; y la absorptancia solar de los elementos constructivos se definen en la Tabla 4.3. La superficie externa del piso a partir de una aproximación, se define adiabática, ya que a la fecha no está reportada en la literatura la metodología para estimar las temperaturas del suelo en edificaciones que no utilizan aire acondicionado. Al considerarlo así, es de esperarse que el factor de decremento sea diferente al real, sin embargo, dado que se están evaluando los diferentes casos de iluminación y su efecto en el desempeño térmico, esto no

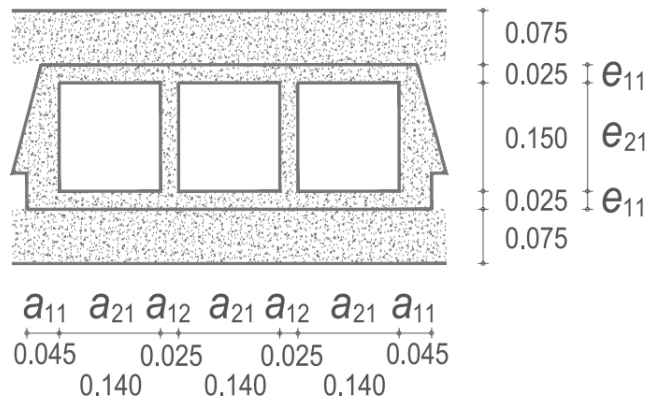


Figura 4.8: Esquema del bloque hueco de la cubierta de altura $E = 2e_{11} + e_{21}$, y largo $A = 2a_{11} + 2a_{12} + 3a_{21}$, con $e_{11} = 0.025 \text{ m}$, $e_{21} = 0.15 \text{ m}$, $a_{11} = 0.045 \text{ m}$, $a_{12} = 0.025 \text{ m}$ y $a_{21} = 0.14 \text{ m}$.

se ve afectado. La ventana se considera como un vidrio flotado de 0.003 m . Se utiliza el clima de Temixco, Morelos para un año típico. Ya que los datos obtenidos por la estación meteorológica del IER presentaba variaciones y en ocasiones omisión de registro de datos, el archivo de clima se obtuvo a través del programa *Meteonorm*, el cual interpola información de estaciones meteorológicas cercanas al sitio. Se realiza la evaluación simulando a lo largo de todo un año.

Se simula el estado actual de la oficina de la dirección del IER-UNAM como referencia, y se simulan tres propuestas con modificaciones sobre las condiciones existentes para evaluar la posibilidad de mejora de los niveles de iluminación y desempeño térmico al interior del espacio.

Caso de estudio estado actual (CEEA)

El CEEA se simula a partir de un modelo que considera las características y los parámetros del estado actual de la oficina de la dirección del IER-UNAM, la ventana en muro fachada sur, el tubo solar instalado en la cubierta inclinada, los espacios colindantes y el árbol existente como se observa en la Figura 4.9. La marca con forma de cruz no puede ser reproducida en las simulaciones. Para este caso, el vidrio del difusor se simula de acuerdo a la reflexión, absorción y transmisión de la luz para un vidrio incoloro de 3 mm con valores de 7% para la reflexión, 17% para la absor-

Tabla 4.1: Sistemas constructivos de muro (SCM), de muro interior (SCMI), de piso (SCP) y de cubierta (SCC), de la oficina de la dirección del IER-UNAM. El orden de los materiales que conforman cada sistema constructivo, se describe de exterior a interior.

Sistema Constructivo	Elemento constructivo	Material	Espesor [m]
SCM	MF-N	Tabique rojo	0.140
	MF-S	Mortero	0.015
	MC-E		
SCMI	MI-O	Mortero	0.015
		Tabique rojo	0.140
		Mortero	0.015
SCP	P-Int	Loseta cerámica	0.010
		Concreto	0.100
SCC	C-Inc	Impermeabilizante	0.005
		Teja de ladrillo	0.020
		Mortero	0.015
		Concreto	0.100
		Capa de aire	0.150
		Concreto	0.100
	Mortero	0.015	

Tabla 4.2: Propiedades térmicas de los materiales, conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (c).

Material	k [$\frac{W}{mK}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	c [$\frac{J}{KgK}$]
Concreto de alta densidad	2.00	2400	1000
Tabique rojo	0.70	1970	800
Mortero	1	1800	1000
Loseta cerámica	1	2000	800
Teja de ladrillo	0.658	1700	837
Impermeabilizante	0.16	1000	600
Aluminio	230	2700	909

Tabla 4.3: Valores de absorptancia solar y acabados utilizados en las simulaciones.

Elemento constructivo	Acabado	Interior Exterior	Absortancia solar
Muros	Tabique aparente color rojo	Exterior	0.65
	Pintura color beige	Interior	0.30
Muro interior	Pintura color beige	Exterior	0.30
	Pintura color beige	Interior	0.30
Piso interior	Loseta cerámica color arena	Interior	0.40
Cubierta inclinada	Impermeabilizante color blanco	Exterior	0.20
	Pintura color blanco	Interior	0.20
Tubo solar	Aluminio	Interior	0.10
		Exterior	

ción y 75 % para la transmisión, conoforme valores de la CAVIPLAN [62] fuente: BI VASA.

Caso de estudio sin tubo solar (CESTS)

El CESTS se simula a partir de un modelo con las mismas características de la oficina de la dirección del IER-UNAM, suprimiendo la existencia del tubo solar en la cubierta inclinada como se observa en la Figura 4.10. El CESTS tiene como objetivo evaluar el desempeño lumínico y térmico de la oficina sin el tubo solar.

Caso de estudio con difusor (CECD)

El CECD se simula a partir de un modelo con las mismas características de la oficina de la dirección del IER-UNAM, modificando los parámetros del vidrio del difusor utilizado para simular el tubo solar, se define como un vidrio con una propiedad cualitativa que convierte la radiación transmitida en luz difusa (vidrio difuso) minimizando la reflexión de las fuentes de luz sobre su superficie. Como se observa en la Figura 4.11 la mo-

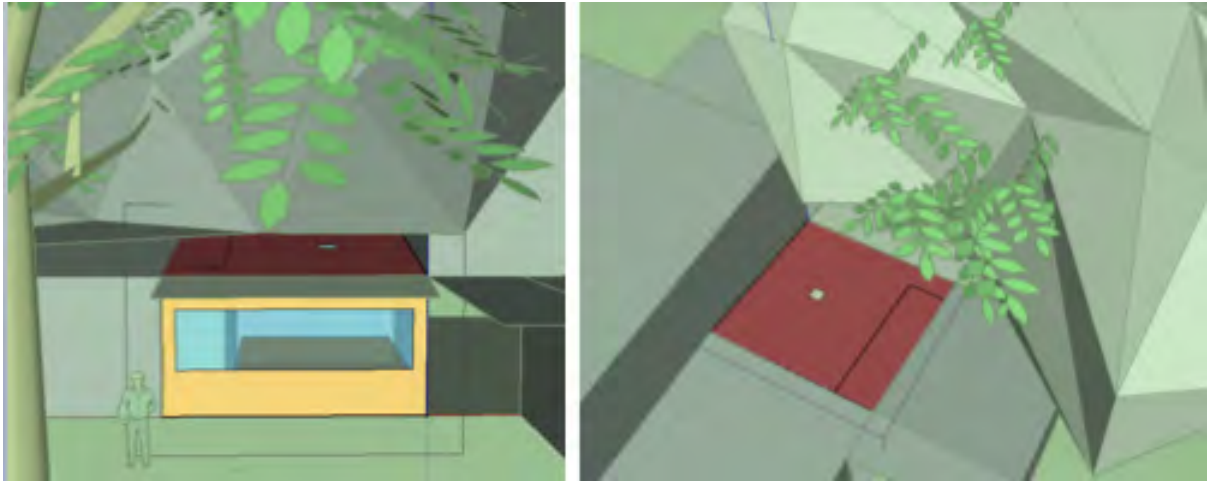


Figura 4.9: Modelo en SketchUp para la simulación del CEEA.

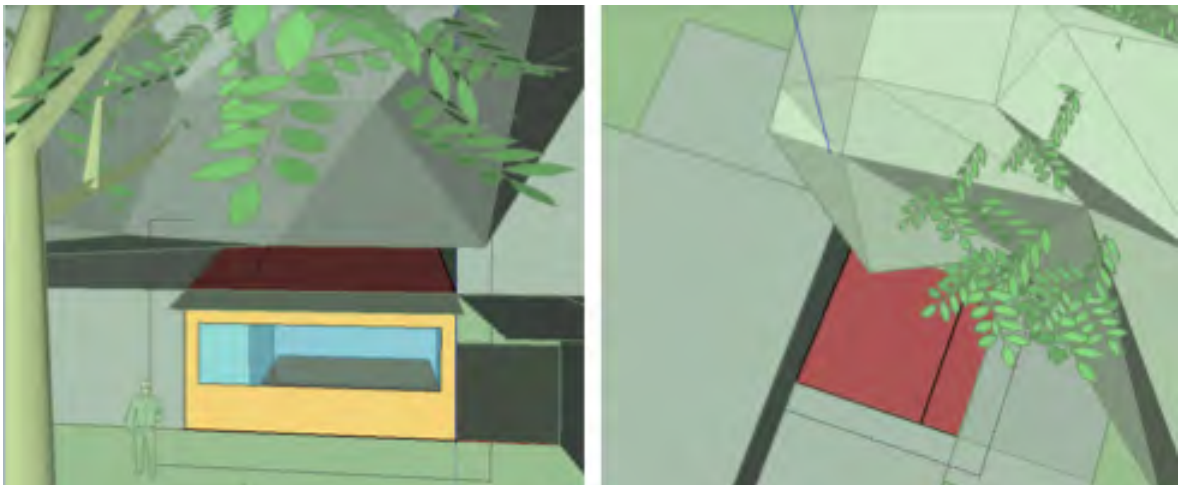


Figura 4.10: Modelo en SketchUp para la simulación del CESTS.

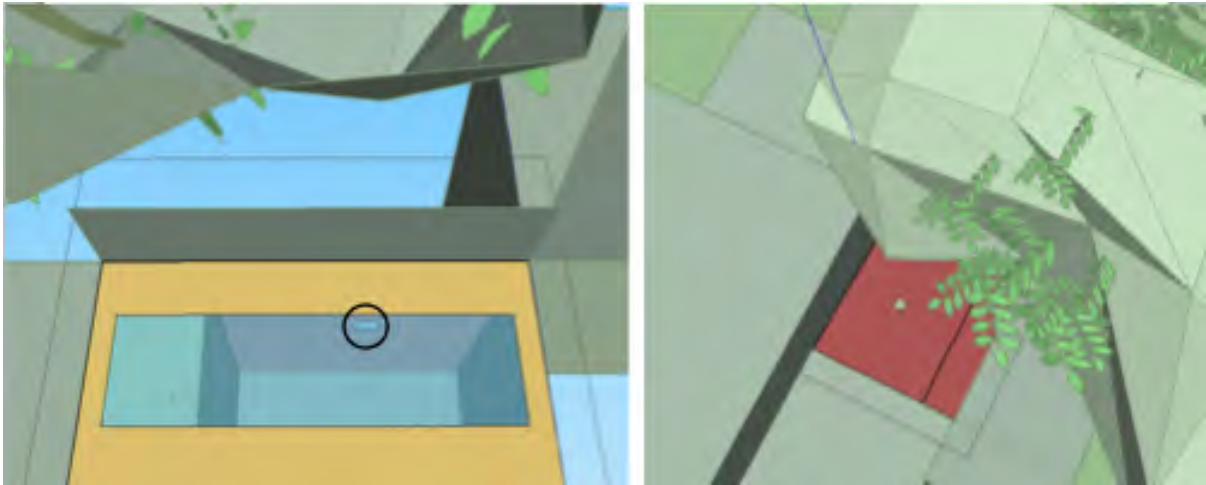


Figura 4.11: Modelo en SketchUp para la simulación del CECD.

dificación en este caso se realiza virtualmente, en la representación gráfica del espacio en SketchUp. El objetivo del CECD es evaluar la propuesta de un difusor al interior del espacio, con la finalidad de poder sustituir el existente.

Caso de estudio con extensión del tubo solar (CECETS)

El CECETS se simula a partir de un modelo con las mismas características de la oficina de la dirección del IER-UNAM, generando una extensión del tubo solar igualando la altura del edificio colindante al este, como se observa en la Figura 4.12; se asigna aluminio como material para los elementos que conforman la extensión, de acuerdo a las propiedades del material mostradas en la Tabla 4.2, con una absorptancia de 0.1, y el vidrio utilizado para simular el tubo solar, se define como un vidrio con propiedad cualitativa que convierte la radiación transmitida en luz difusa (vidrio difuso) minimizando la reflexión de las fuentes de luz sobre su superficie. Con el objetivo de mejorar las condiciones existentes, el CECETS consiste en incrementar la altura del tubo solar para evitar las sombras generadas por el edificio colindante y el árbol.

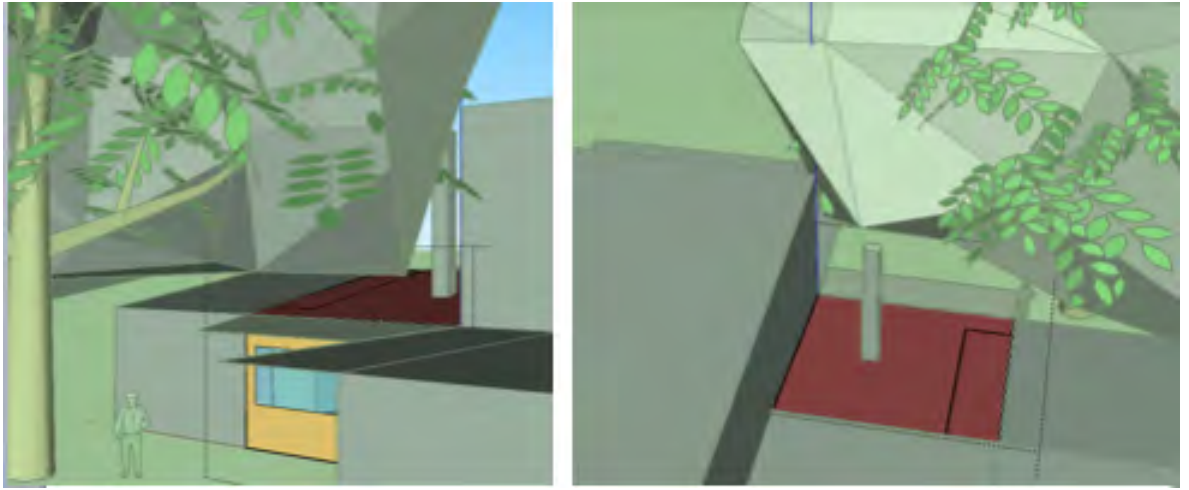


Figura 4.12: Modelo en SketchUp para la simulación del CECETS.

4.3. Simulaciones

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para cada uno de los casos de estudio. Primero se analizaron los cuatro casos de estudio por mes, seleccionando 12 días del año, cada uno correspondiente a los días 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, y 355 julianos para cada mes, reportando los resultados numéricos de los mapas de iluminancia a las 12:00 horas, todos presentados en tiempo solar. Y luego se analizaron cada uno de los cuatro casos de estudio en el día 209 juliano por ser el día en el cual el sol pasa por el cenit, y se presenta el resultado de las 7:00 a las 18:00 horas. Los mapas de iluminancia analizados en cada uno de los casos de estudio corresponden a una superficie de $4.00\text{ m} \times 5.00\text{ m}$ a una altura de 0.76 m (altura del escritorio, superficie de trabajo). Los resultados se presentan con una escala de 0 lx a 3000 lx , a pesar de que se alcanzan niveles de iluminancia mayores a 8000 lx , para facilidad de lectura y apreciación de los resultados.

En la Figura 4.13 se presentan los mapas de iluminancia al interior del CEEA para un día de cada mes a las 12:00 horas. Se observa la presencia de la marca, resultado de la transmisión de radiación directa por el tubo solar con valores por arriba de los 3000 lx , en 7 de los 12 meses (marzo a septiembre), lo que representa más del 50 % del año. La marca aparece sobre la superficie, del día 76 juliano hasta el día 282 juliano. La mayor parte del

año se presenta una incidencia de iluminación por la ventana con valores por arriba de los 3000 lx como se observa en la parte inferior en la mayoría de los campos de iluminancia. La marca central en los mapas es resultado de la incidencia de iluminación por radiación directa a través del tubo solar, la cual tiene presencia a lo largo de todo el año, en los meses (marzo a septiembre) que se observa en los mapas, y se da por la proyección que tienen sobre la superficie de análisis, el resto de los meses (octubre a febrero) la marca se proyecta sobre los muros, como resultado de la trayectoria aparente del sol.

En la Figura 4.14 se presentan los mapas de iluminancia al interior del CEEA durante el día 209 juliano por cada hora desde las 7:00 a las 18:00 horas. A partir de las 10:00 horas se puede observar la incidencia de radiación directa a través del tubo solar, con niveles de iluminación mayores a los 8000 lx ; esta marca de radiación directa se mantiene presente hasta las 13:00 horas, con un recorrido de acuerdo a la trayectoria aparente del sol sobre la superficie de análisis. En todos los mapas de iluminancia siempre se ve la influencia de la ventana desde las 8:00 hasta las 17:00 horas.

En la Figura 4.15, se presentan los mapas de iluminancia del CESTS para un día de cada mes a las 12:00 horas. Dado que ya no existe el tubo solar en este caso ya no se observa la presencia de la marca en el centro. Los meses en los que el sol se encuentra hacia el sur, la incidencia de iluminación natural es mayor en el área de la ventana, resultado de la orientación de la ventana (fachada sur), con niveles superiores a los 3000 lx , de manera uniforme en una superficie cercana al primer metro contiguo al paramento de la ventana.

En la Figura 4.16 se presentan los mapas de iluminancia del CESTS durante el día 209 juliano, cuando el sol pasa por el cenit, por cada hora desde las 7:00 a las 18:00 horas. Durante las primeras dos horas, el nivel de iluminación es uniforme, en las horas posteriores se presenta una incidencia de iluminación mayor en el área interior inmediata al paramento de la ventana (1 m).

En la Figura 4.17, se presentan los mapas de iluminancia al interior del CECD para un día de cada mes a las 12:00 horas. Los resultados de esta simulación se parecen mucho a los resultados del CESTS, lo que indica que la luz que entra por el tubo solar se distribuye homogéneamente, pareciendo no afectar al espacio dado los niveles de iluminación que hay.

En la Figura 4.18 se presentan los mapas de iluminancia al interior del CECD durante el día 209 juliano por cada hora desde las 7:00 a las 18:00 ho-

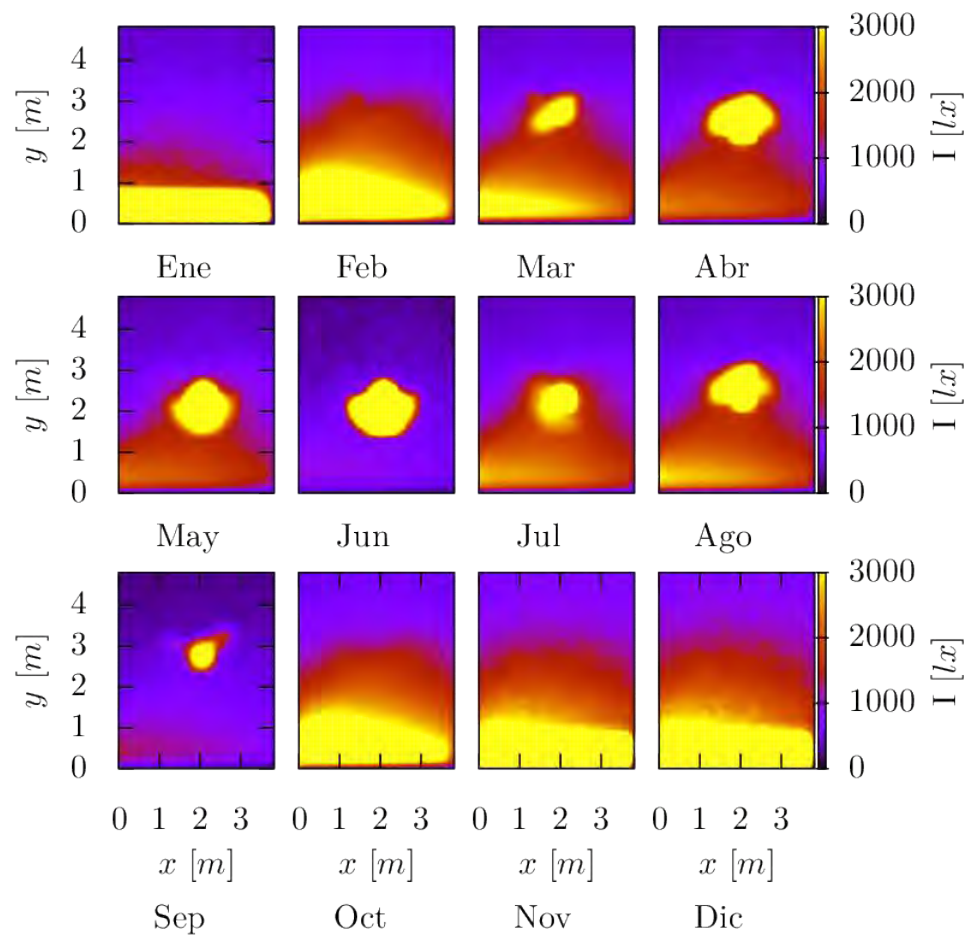


Figura 4.13: Mapas de iluminancia para el CEEA por cada mes (enero - diciembre) a lo largo del año a las 12:00 horas. Días julianos: 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, 355, correspondientes cada día a un mes del año.

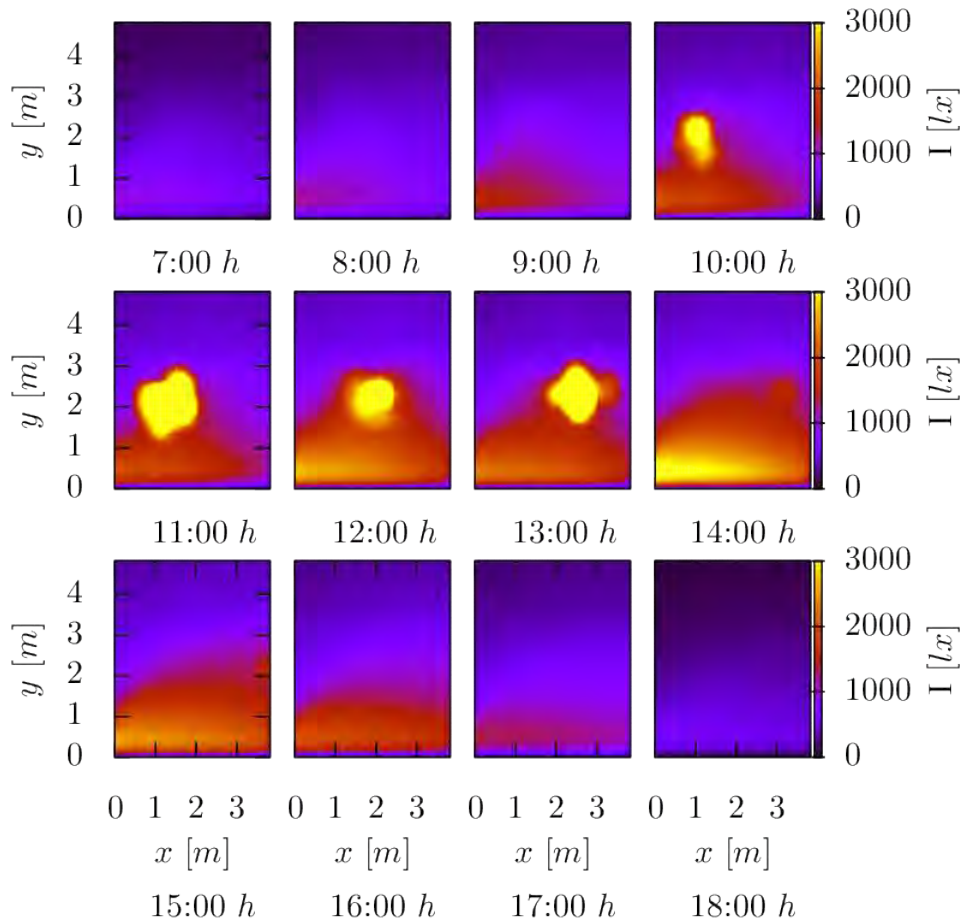


Figura 4.14: Mapas de iluminancia durante cada hora para el CEEA para el día 209 juliano.

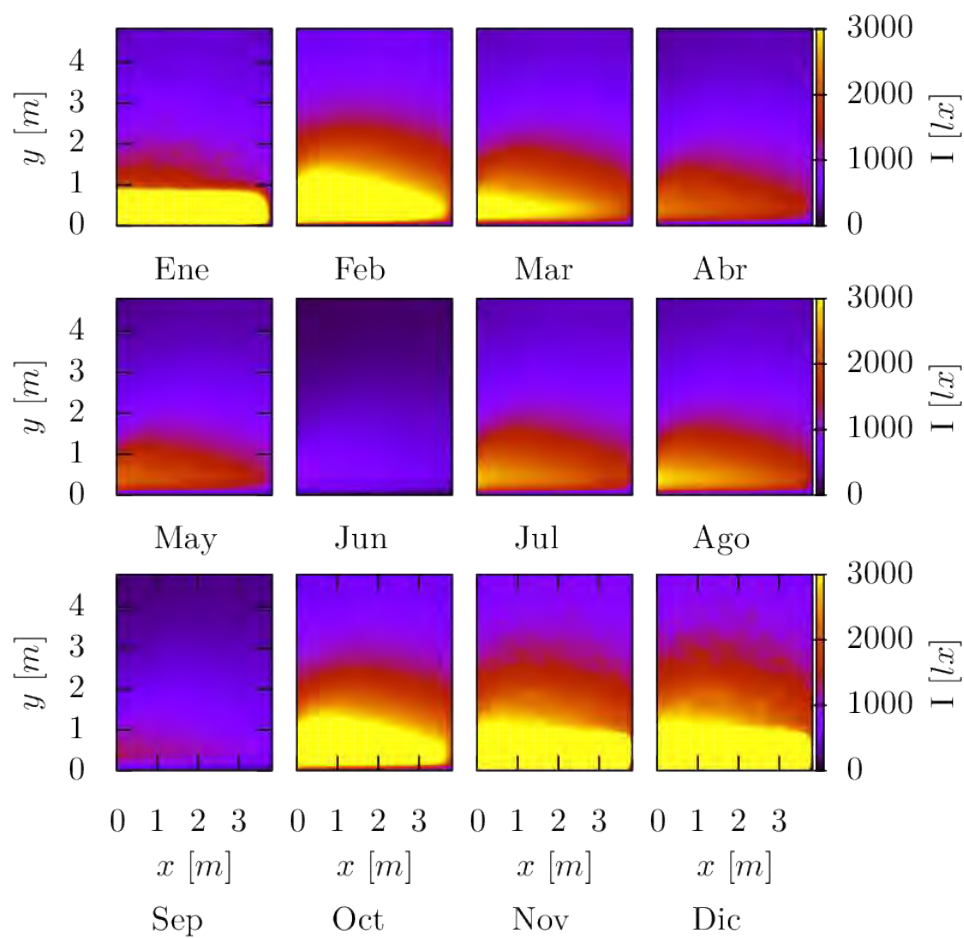


Figura 4.15: Mapas de iluminancia para el CESTS por cada mes (enero - diciembre) a lo largo del año a las 12:00 horas. Días julianos: 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, 355, correspondientes cada día a un mes del año.

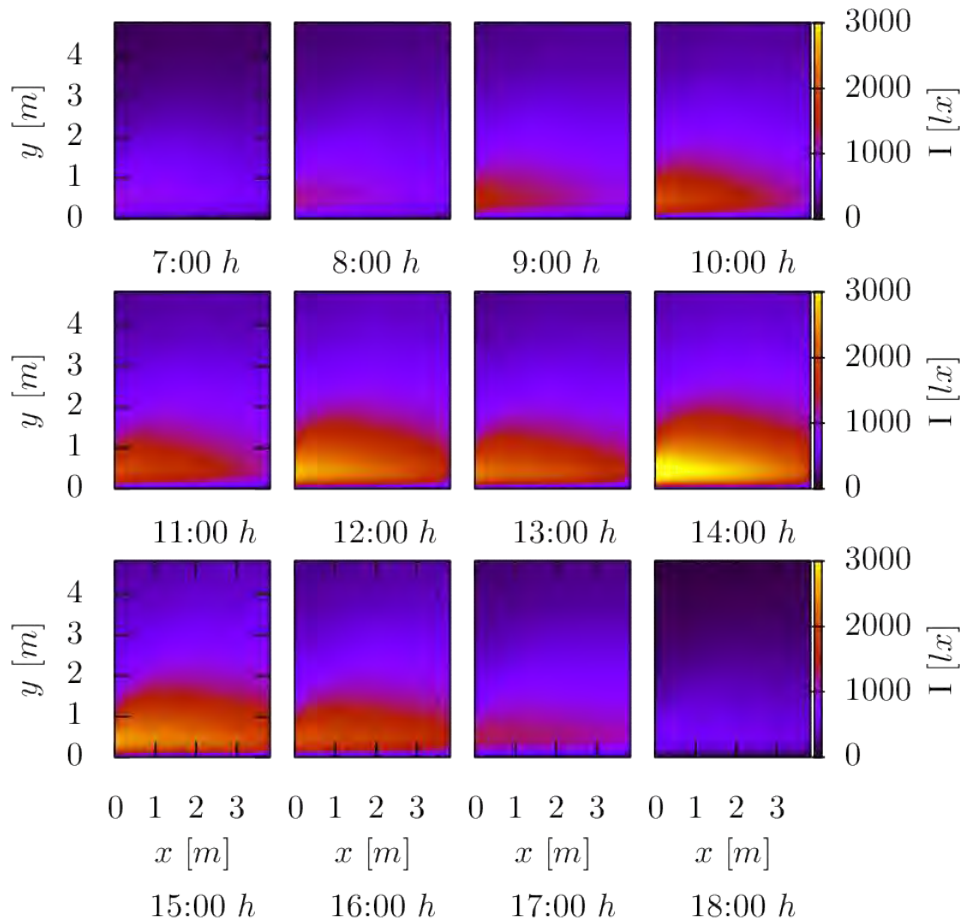


Figura 4.16: Mapas de iluminancia durante cada hora para el CESTS para el día 209 juliano.

ras. Los mapas de iluminancia se ven idénticos a los resultados del CESTS para el día 209 juliano.

En la Figura 4.19, se presentan los mapas de iluminancia al interior del CECETS para un día de cada mes a las 12:00 horas, con mayor iluminación en los meses de octubre a marzo como en los casos anteriores, sin embargo tampoco existe una iluminación homogénea al interior de la oficina. Agregar la extensión del tubo solar parece no mejorar los niveles de iluminación respecto al caso CECD y CESTS. Los resultados de este caso son muy parecidos a los resultados del CECD y a los del CESTS por cada mes a lo largo del año a las 12:00 horas.

En la Figura 4.20 se presentan los mapas de iluminancia al interior del CECETS durante el día 209 juliano por cada hora desde las 7:00 a las 18:00 horas. Para el CECETS al igual que para el CESTS y el CECD cuando se analiza la incidencia de iluminación para el día 209 juliano, en general a lo largo de todo el día el nivel de iluminación es uniforme, considerando una incidencia mayor de las 12:00 a las 16:00 horas en el área interior inmediata al paramento de la ventana (1m).

Evaluación del desempeño lumínico y térmico

En esta sección se presenta la evaluación de la oficina de la dirección en el IER-UNAM con los parámetros Iluminancia Útil por Luz Natural (UDI), y el diagrama definido en la sección 2.5 usando el Factor de Decremento (FD) y la Frecuencia de Confort Visual (FCV).

De la Figura 4.21 a la Figura 4.23 se presentan los resultados del UDI , para cada uno de los cuatro casos de estudio CEEA, CESTS, CECD, CECETS. Para cada caso de estudio se calcula el UDI , el valor correspondiente a una subiluminación (UDI_-), el valor correspondiente a una iluminación adecuada (UDI_u), y el valor correspondiente a una sobreiluminación (UDI_+), con un horario de evaluación de las 8:00 a las 18:00 h. Para estas evaluaciones se utiliza el rango de un límite inferior de iluminancia $E_{LL} = 150 lx$ y un límite superior de iluminancia $E_{UL} = 750 lx$, como lo establece Sicurella *et al.* [33], en la literatura a partir de planteamiento en donde expone:

«La definición de la gama de confort visual es crítica, ya que depende del contexto real de trabajo, la tarea visual, la iluminancia, etc. Muchas investigaciones basadas en encuestas establecen el límite inferior en $100 lx$ y el límite superior en

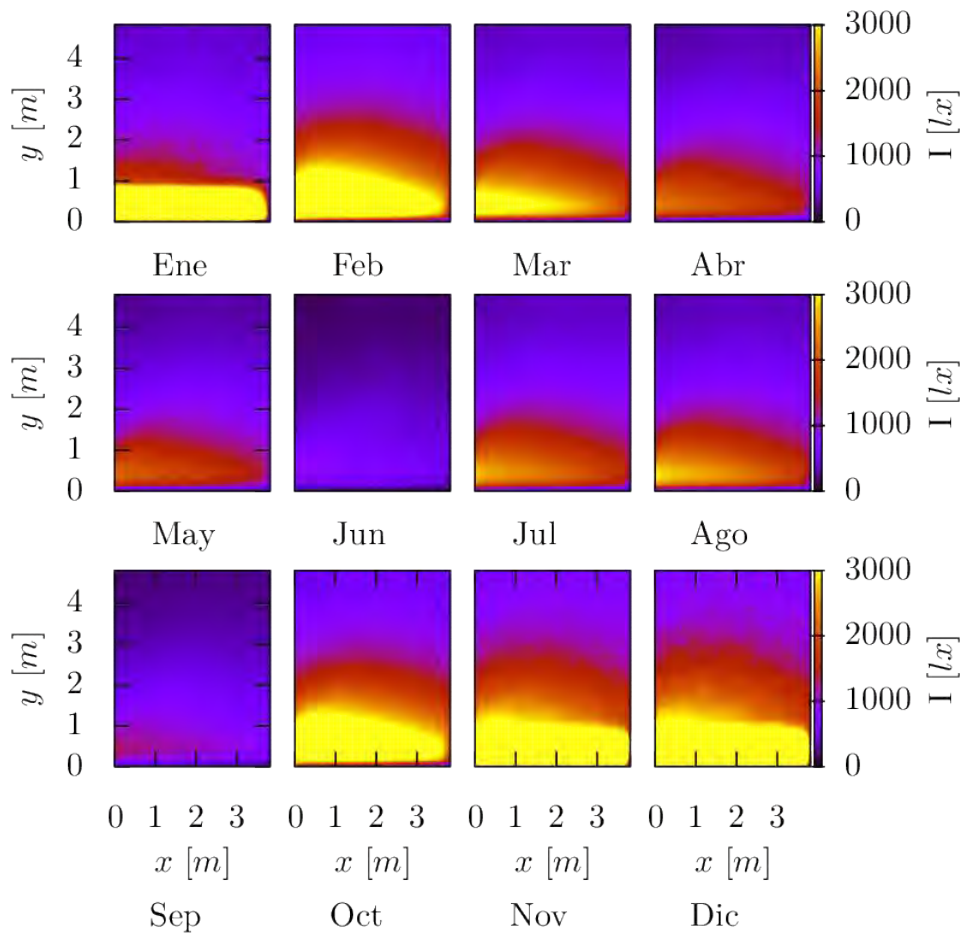


Figura 4.17: Mapas de iluminancia para el CECD por cada mes (enero - diciembre) a lo largo del año a las 12:00 horas. Días julianos: 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, 355, correspondientes cada día a un mes del año.

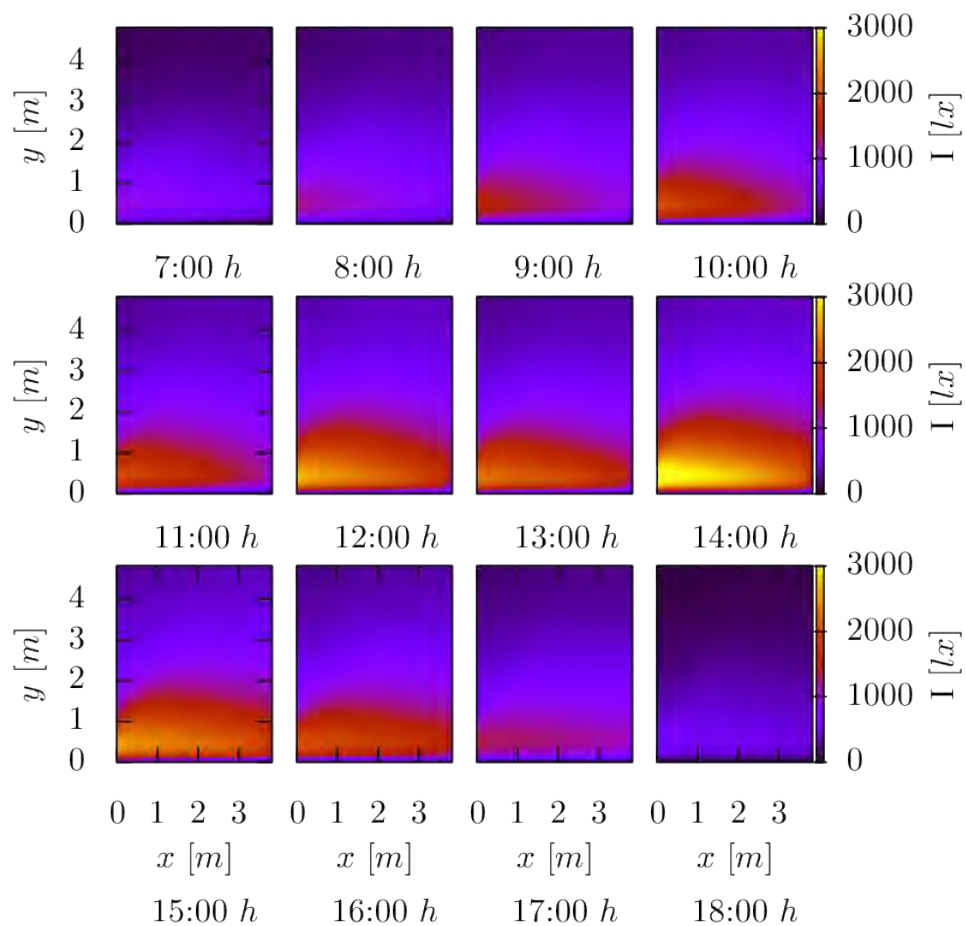


Figura 4.18: Mapas de iluminancia durante cada hora para el CECD para el día 209 juliano.

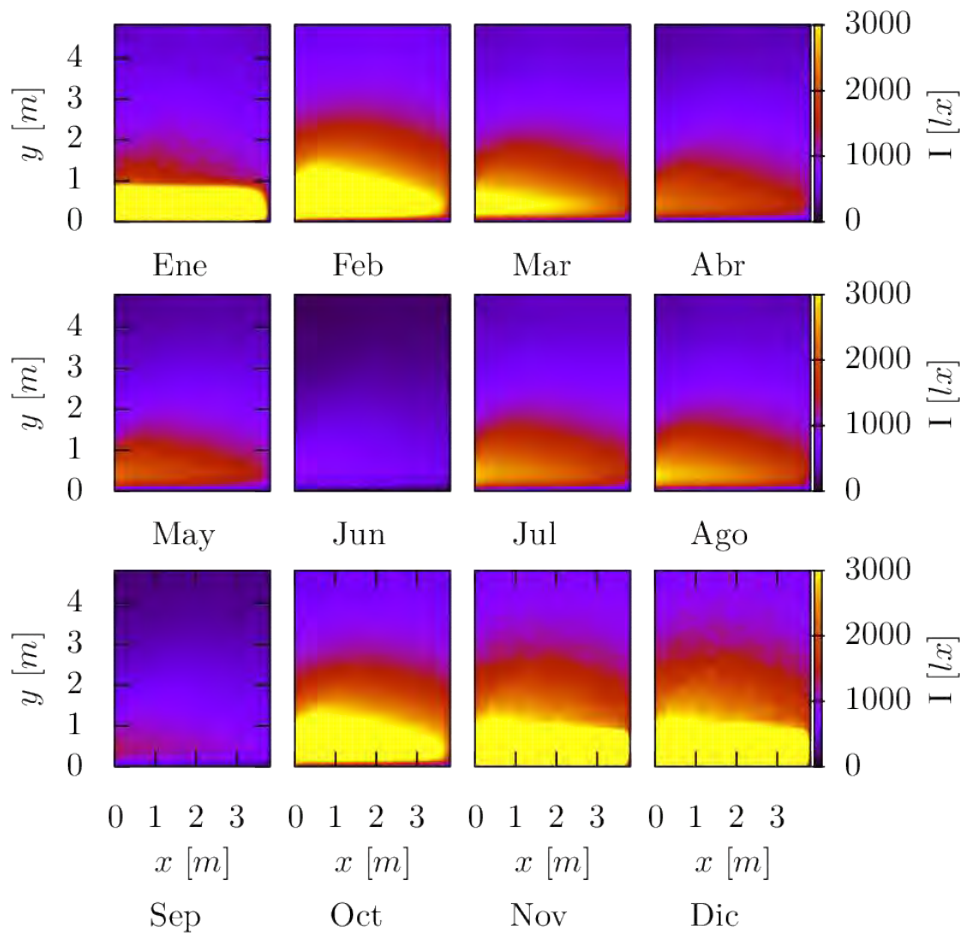


Figura 4.19: Mapas de iluminancia para el CECETS por cada mes (enero - diciembre) a lo largo del año a las 12:00 horas. Días julianos: 20, 52, 82, 114, 150, 180, 209, 239, 269, 298, 328, 355, correspondientes cada día a un mes del año.

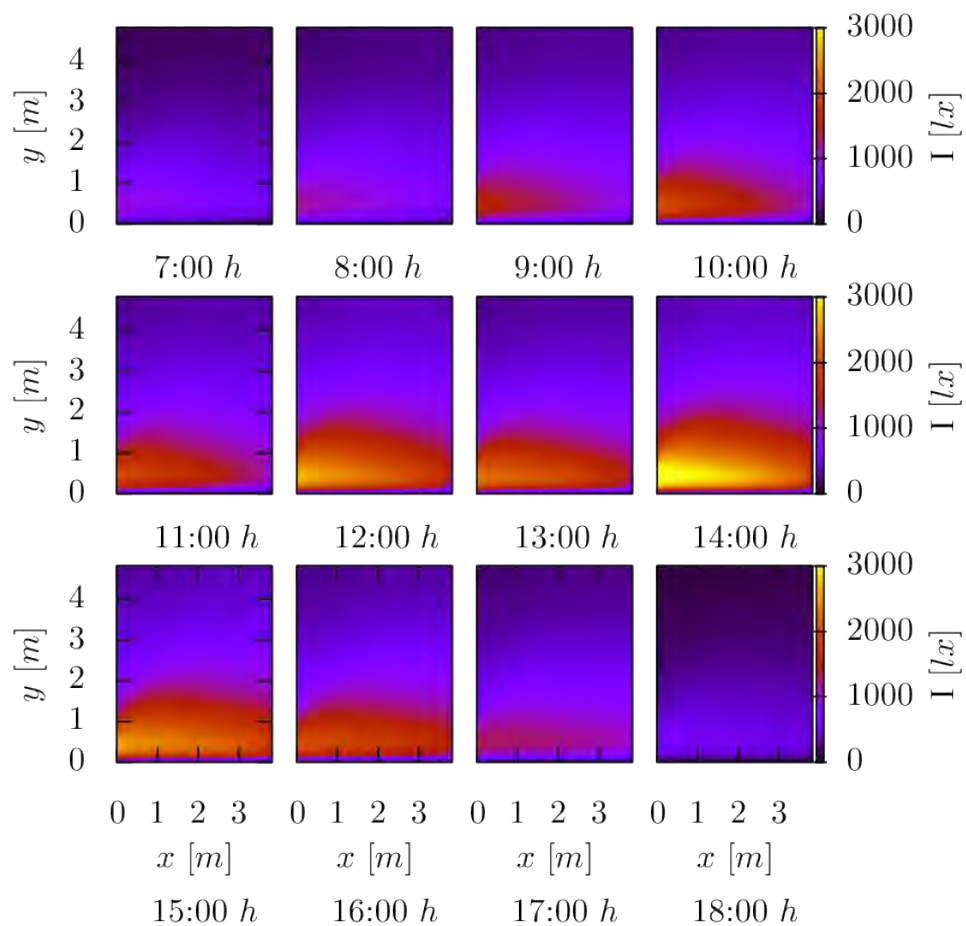


Figura 4.20: Mapas de iluminancia durante cada hora para el CECETS para el día 209 juliano.

2000 lx, Nabil y Mardajevic [39]. Siguiendo el enfoque de los autores basado en la iluminación diurna promedio, el cumplimiento de la misma gama no es adecuado ya que no evitaría una iluminación diurna demasiado alta o demasiado baja localmente. En el presente trabajo se supone $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$; sin embargo estos valores pueden variar dependiendo de los requisitos de diseño, el uso real del edificio y la tarea visual.» [33]

Para el UDI_- mostrado en la Figura 4.21, se puede observar que todo el espacio analizado se encuentra subiluminado un 10 % del tiempo en los cuatro casos. Para el UDI_u mostrado en la Figura 4.22, se puede observar que para el (b) CESTS, (c) CECD y (d) CECETS aproximadamente, el tercio inferior del espacio analizado se encuentra del 10 % al 30 % del tiempo en los valores adecuados de iluminación, el tercio intermedio del espacio analizado se encuentra del 30 % al 60 % del tiempo en los valores adecuados de iluminación, y el tercio superior se encuentra del 60 % al 80 % del tiempo en los valores adecuados de iluminación; mientras que para el (a) CEEA el tercio intermedio se encuentra del 30 % al 50 % del tiempo en los valores adecuados de iluminación. Para el UDI_+ mostrado en la Figura 4.23, se puede observar que para el (b) CESTS, (c) CECD y (d) CECETS aproximadamente, el tercio inferior del espacio analizado se encuentra del 70 % al 90 % del tiempo sobreiluminado, el tercio intermedio del espacio analizado se encuentra del 20 % al 70 % del tiempo sobreiluminado y el tercio superior se encuentra del 5 % al 20 % del tiempo sobreiluminado; mientras que para el (a) CEEA, el tercio intermedio se encuentra del 50 % al 80 % del tiempo sobreiluminado debido a la entrada de radiación solar directa a través del tubo solar.

A partir de los resultados del UDI_- , UDI_u y UDI_+ se puede observar que no existe homogeneidad en los niveles de iluminación a lo largo del año, en ninguno de los cuatro casos de estudio, principalmente debido a la existencia de la ventana en fachada sur, y a la ausencia de un vano y/o ventana en fachada norte. Para el (a) CEEA la presencia del tubo solar es evidente ya que se reducen los porcentajes del tiempo en el que se encuentra dentro de los valores adecuados de iluminación siendo el tercio intermedio, correspondiente con la ubicación del tubo solar, el que se encuentra en un mayor porcentaje del tiempo sobreiluminado.

A partir de los niveles mínimos de iluminación definidos en la NOM-025-STPS-2008 [8] para áreas de trabajo de oficina de 300 lx y el promedio de los niveles máximos de iluminación de 1500 lx registrados durante las

mediciones experimentales al interior de la oficina de dirección del IER (Capítulo 3); se propone modificar los valores de $E_{LL} = 150 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 750 \text{ lx}$ propuestos por Sicurella *et al.* [33] a $E_{LL} = 300 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 1500 \text{ lx}$.

De acuerdo a estos rangos, se analizaron nuevamente los resultados de las simulaciones para cada uno de los cuatro casos, de la Figura 4.24 a la Figura 4.26 correspondientes al UDI_- , UDI_u , y UDI_+ , respectivamente.

En la Figura 4.24 para el UDI_- , se puede observar que para el (b) CESTS, (c) CECD y (d) CECETS el tercio inferior del espacio analizado se encuentra el 0 % aproximadamente del tiempo subiluminado, el tercio intermedio del espacio analizado se encuentra del 1 % al 20 % aproximadamente del tiempo subiluminado, y el tercio superior del espacio analizado se encuentra del 21 % al 40 % aproximadamente del tiempo subiluminado; mientras que para el (a) CEEA el tercio intermedio se encuentra del 0 % al 10 % aproximadamente del tiempo subiluminado y el tercio superior se encuentra del 11 % al 30 % aproximadamente del tiempo subiluminado.

En la Figura 4.25 para el UDI_u , puede observarse que para el (b) CESTS, (c) CECD y (d) CECETS aproximadamente el tercio inferior del espacio analizado se encuentra del 30 % al 60 % aproximadamente del tiempo en los valores adecuados de iluminación, el tercio intermedio del espacio analizado se encuentra del 70 % al 90 % aproximadamente del tiempo dentro de los valores adecuados de iluminación, y el tercio superior del espacio analizado se encuentra del 50 % al 70 % aproximadamente del tiempo dentro de los valores adecuados de iluminación; mientras que para el (a) CEEA, el tercio inferior del espacio analizado se encuentra del 30 % al 50 % aproximadamente del tiempo dentro de los valores adecuados de iluminación, el tercio intermedio del espacio analizado se encuentra del 50 % al 70 % aproximadamente del tiempo dentro de los valores adecuados de iluminación, y el tercio superior del 60 % al 80 % aproximadamente del tiempo dentro de los valores adecuados de iluminación.

En la Figura 4.26 para el UDI_+ , se puede observar que para el (b) CESTS, (c) CECD y (d) CECETS aproximadamente el tercio inferior del espacio analizado se encuentra el 60 % aproximadamente del tiempo sobreiluminado, el tercio intermedio del espacio analizado se encuentra del 10 % al 30 % aproximadamente del tiempo sobreiluminado, y el tercio superior se encuentra del 0 % al 5 % aproximadamente del tiempo sobreiluminado; mientras que para el (a) CEEA, el tercio inferior del espacio analizado se encuentra el 60 % aproximadamente del tiempo sobreiluminado, el tercio intermedio del espacio analizado se encuentra del 20 % al 40 %

aproximadamente del tiempo sobreiluminado, y el tercio superior del 0% al 10% aproximadamente del tiempo sobreiluminado.

Las evaluaciones de la Frecuencia de Confort Visual se realizaron, primero, a partir de los rangos establecidos por Sicurella *et al.* [33] con $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, y después, a partir de los rangos propuestos en esta tesis con $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$. Se definieron dos áreas para evaluación, la primera corresponde a la totalidad del espacio al interior de cada caso de estudio, y la segunda corresponde al perímetro delimitado como área de trabajo (AT) dentro de la oficina de dirección del IER-UNAM, con el objetivo de evaluar el área donde se encuentra localizado el escritorio actualmente ($1.90 \times 2.54 m$).

En la Figura 4.27 se presentan las evaluaciones del desempeño térmico y lumínico para todo el espacio al interior de la oficina para cada uno de los casos con $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, como lo estableció Sicurella *et al.* [33], con valores promedio por cada mes (enero a diciembre) a lo largo de un año del FD y de la FCV . Las variaciones entre los cuatro casos son mínimas. En los cuatro casos los meses de marzo a agosto se localizan en la zona 3 (alta frecuencia de confort visual y bajo factor de decremento), siendo ésta la zona esperada, sin embargo, como se puede observar para el CEEA los resultados de estos meses están ligeramente cargados hacia la zona 1 (baja frecuencia de confort visual y bajo factor de decremento). Para los cuatro casos, se puede observar que los meses con una mayor FCV son de marzo a octubre, siendo julio el mes más alto, y que los meses en los que se presenta un mayor FD son enero, junio, julio, agosto y diciembre, siendo enero el mes más alto, consecuencia de la orientación de la fachada sur en donde se encuentra la ventana y la inclinación del sol para el mes de enero.

En las Tablas 4.4 y 4.5 se presentan los valores correspondientes de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), para cada uno de los casos, CEEA, CESTS, CECD y CECETS; en donde se puede apreciar que las variaciones entre los cuatro casos son mínimas, del orden de los decimales.

En la Tabla 4.6 se presentan las diferencias de los porcentajes promedio por cada mes para el FD y la FCV entre el CEEA y los casos de estudio CESTS, CECD y CECETS. Para el FD una diferencia positiva representa una mejora y los valores negativos una baja en el desempeño térmico; al contrario de lo que ocurre para la FCV en donde los valores positivos

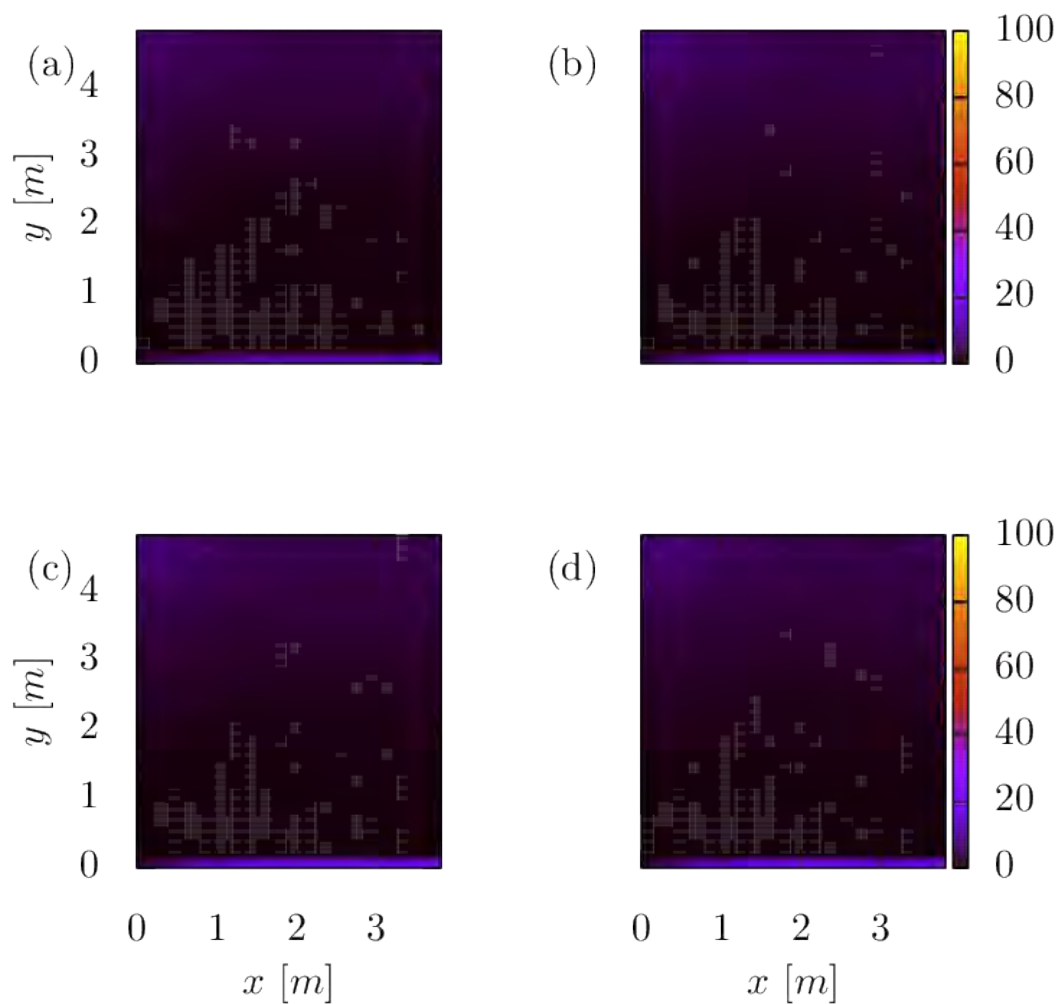


Figura 4.21: UDI_- para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.

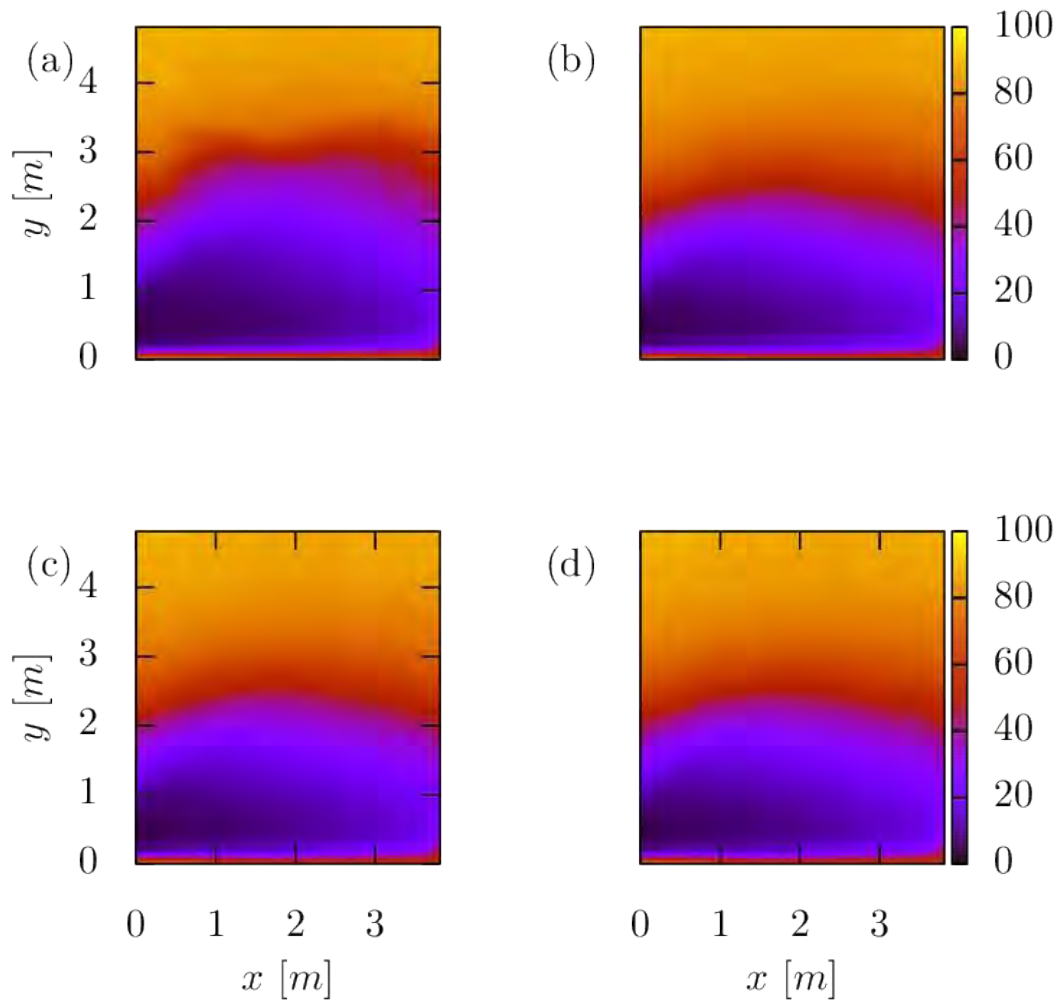


Figura 4.22: UDI_u para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{VL} = 750 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.

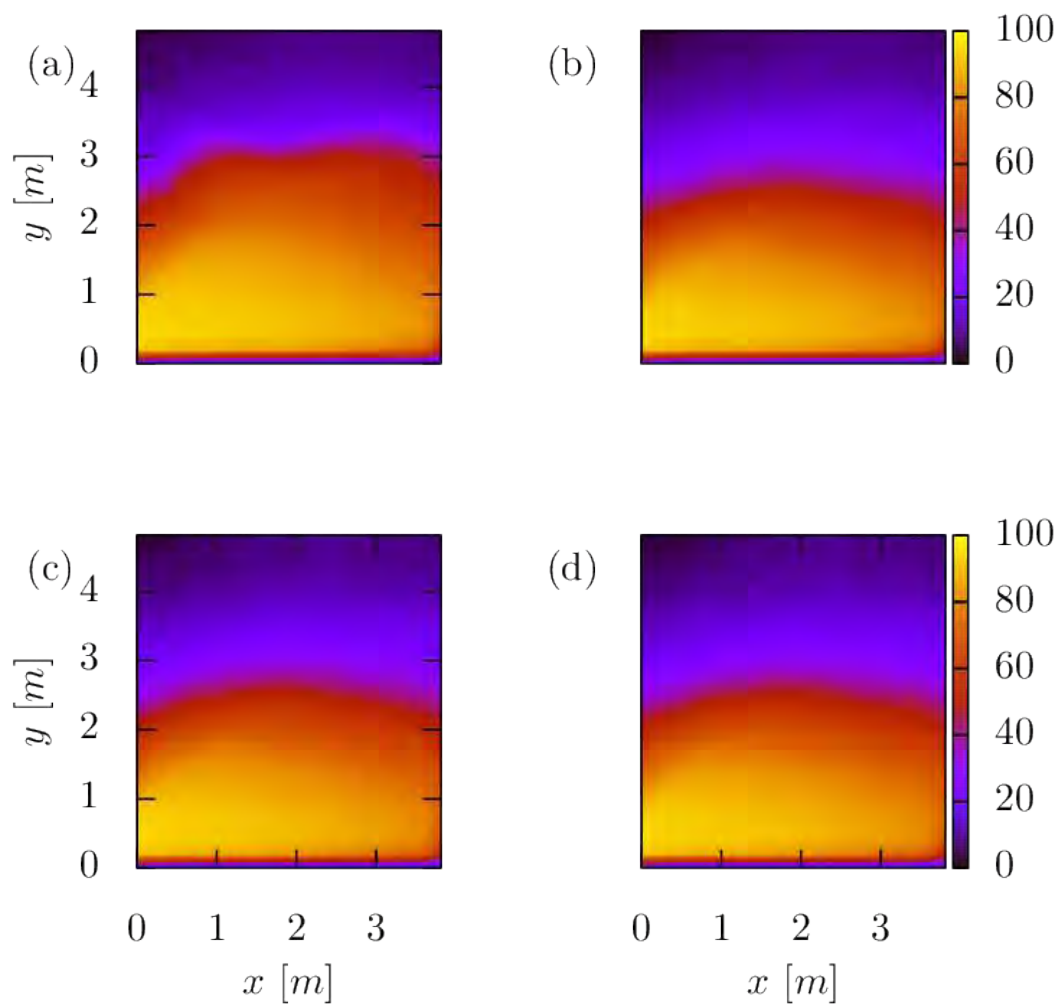


Figura 4.23: UDI_+ para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 150 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 750 \text{ lx}$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.

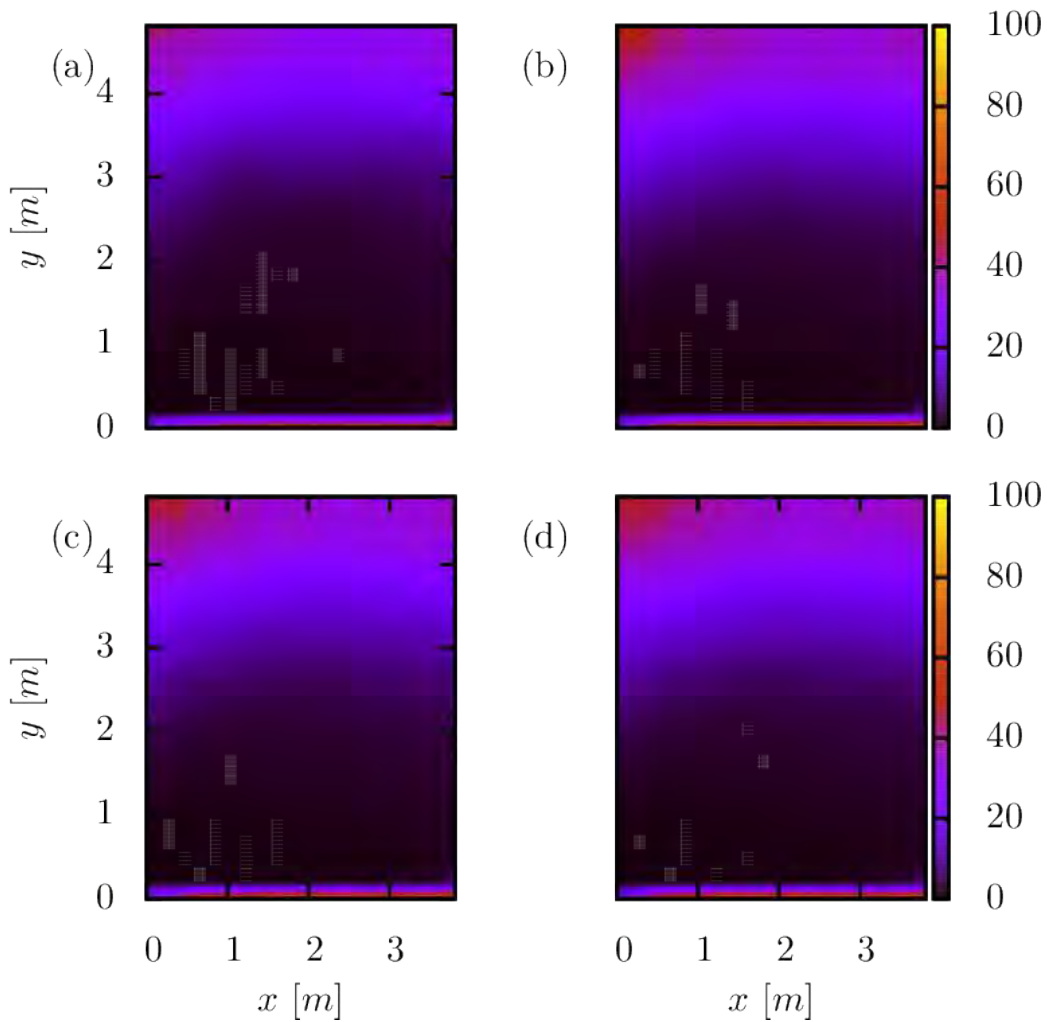


Figura 4.24: UDI_- para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.

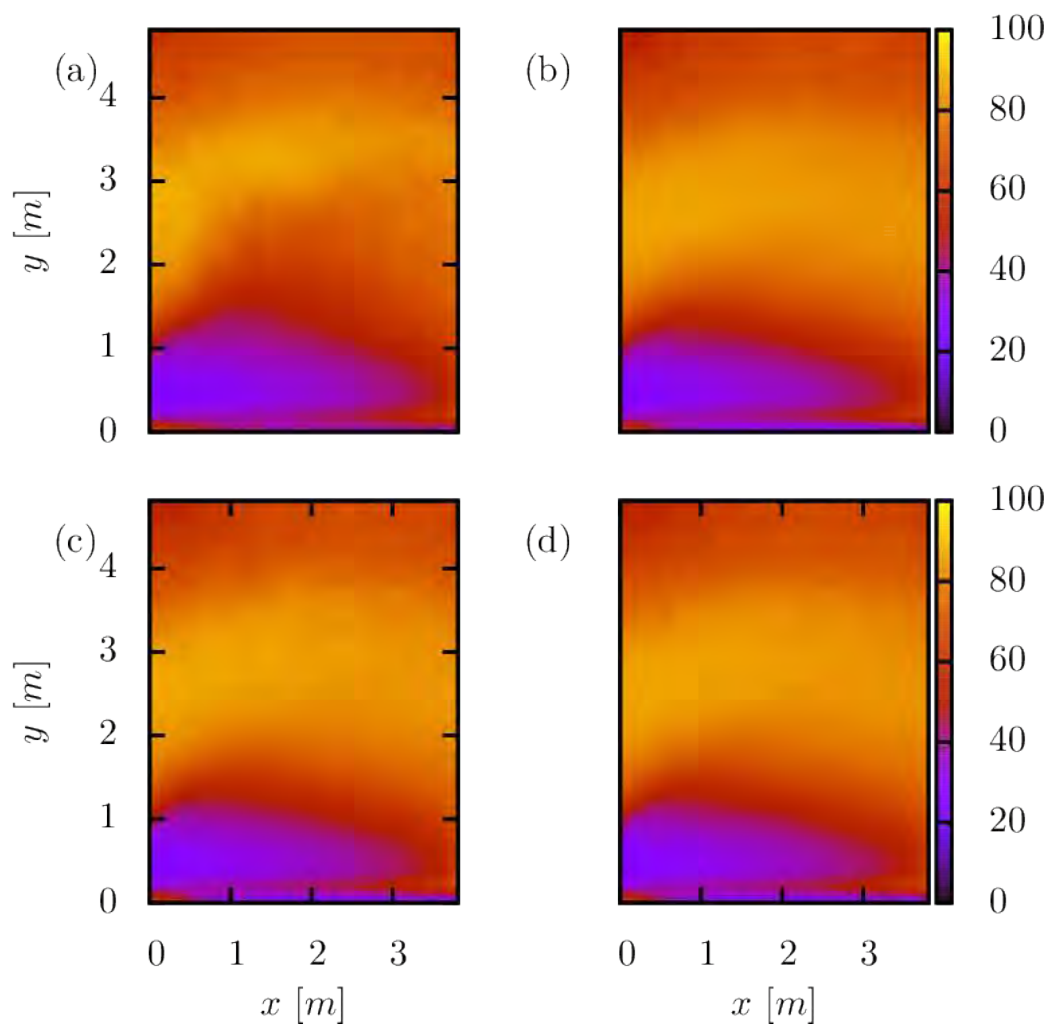


Figura 4.25: UDI_u para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.

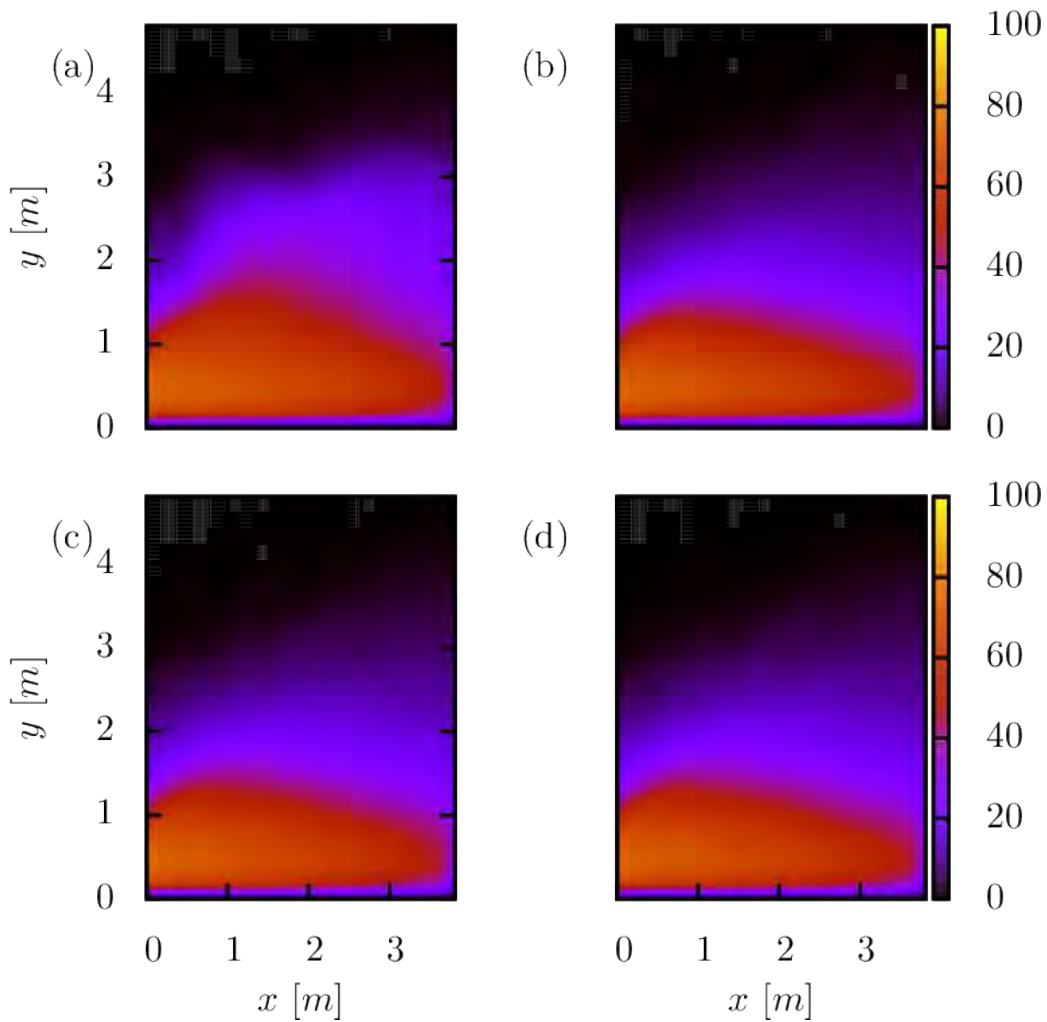


Figura 4.26: UDI_+ para la oficina de la dirección del IER-UNAM de los casos (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS, usando el rango $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$. La escala del 0 al 100 representa porcentaje de tiempo.

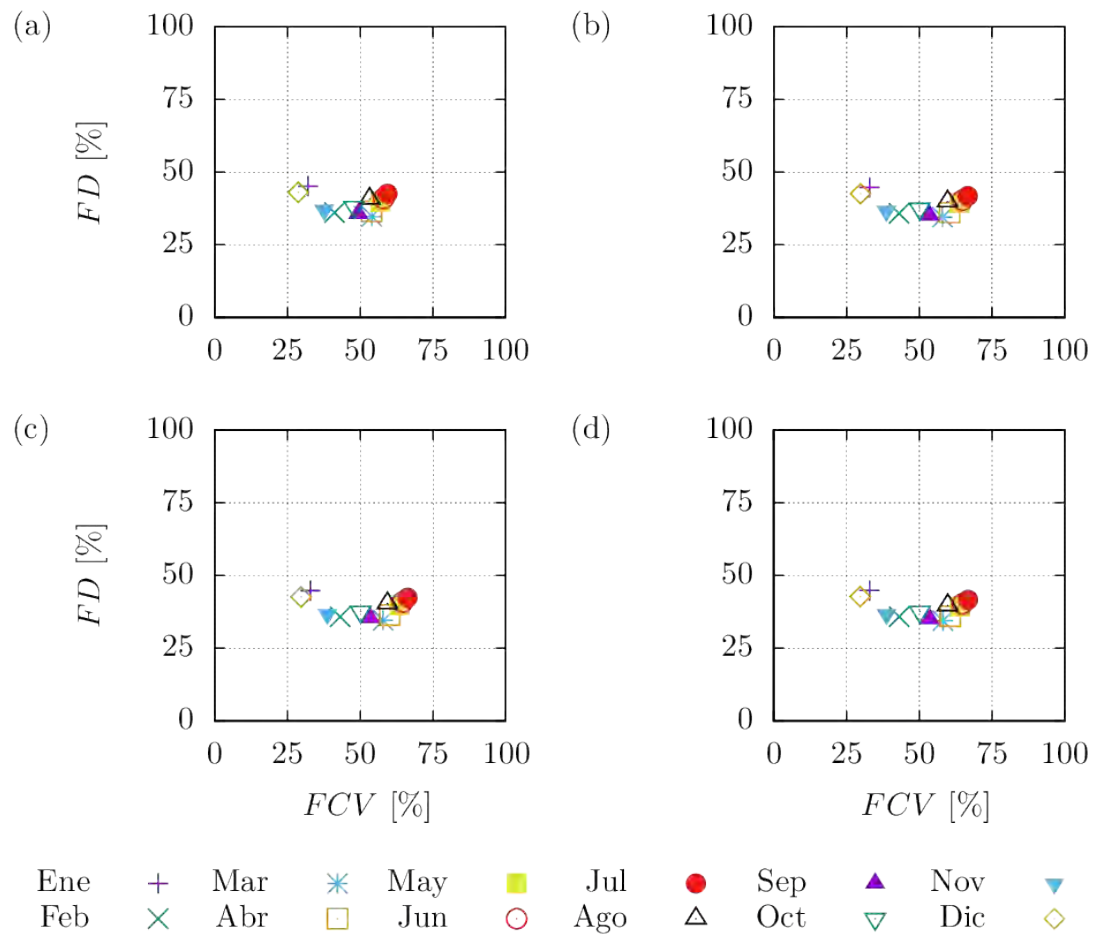


Figura 4.27: Evaluación del desempeño lumínico y térmico al interior del caso de estudio por cada mes a lo largo del año. Para la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{VL} = 750 lx$, para los (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.

Tabla 4.4: Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150lx$ y $E_{UL} = 750lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), de los casos CEEA, y CESTS.

Mes	CEEA				CESTS			
	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
Ene	45.18	10.28	32.07	8.80	44.71	10.20	32.88	8.40
Feb	36.09	3.93	41.15	9.18	35.73	3.80	43.00	9.50
Mar	34.76	3.48	53.97	11.06	34.46	3.45	57.98	12.20
Abr	36.49	3.70	53.89	9.64	36.01	3.67	60.51	11.25
May	39.81	11.93	56.94	8.93	39.35	11.84	63.91	10.00
Jun	40.95	6.64	58.04	9.68	40.35	6.58	64.86	10.58
Jul	42.61	5.82	59.32	11.31	41.76	5.64	66.68	11.82
Ago	40.75	5.91	53.21	7.70	39.83	5.76	59.71	8.67
Sep	35.62	3.24	49.28	8.86	35.04	3.23	53.49	9.66
Oct	38.11	9.72	47.92	10.28	37.54	9.50	50.11	10.70
Nov	37.08	4.10	37.57	9.61	36.68	3.95	38.65	9.65
Dic	43.10	6.74	28.68	10.01	42.58	6.65	29.80	10.49

Tabla 4.5: Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150lx$ y $E_{UL} = 750lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), de los casos CECD y CECETS.

Mes	CECD				CECETS			
	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
Ene	44.77	10.20	32.83	8.53	44.81	10.28	32.81	8.54
Feb	35.78	3.86	43.06	9.60	35.81	3.92	43.08	9.62
Mar	34.57	3.44	57.85	12.2	34.42	3.46	58.09	12.22
Abr	36.36	3.65	60.11	11.17	35.94	3.67	60.57	11.22
May	39.70	11.90	63.46	9.90	39.33	11.94	63.94	9.97
Jun	40.78	6.62	64.47	10.57	40.27	6.62	64.89	10.57
Jul	42.34	5.72	66.24	11.91	41.61	5.64	66.73	11.88
Ago	40.36	5.84	59.32	8.59	39.71	5.83	59.74	8.68
Sep	35.29	3.24	53.35	9.66	34.93	3.24	53.58	9.73
Oct	37.60	9.47	50.16	10.70	37.59	9.65	50.19	10.73
Nov	36.76	3.94	38.68	9.73	36.74	4.00	38.75	9.73
Dic	42.64	6.62	29.65	10.50	42.72	6.70	29.70	10.52

Tabla 4.6: Diferencia de los porcentajes promedio entre el CEEA y cada caso de estudio (CE). Casos CESTS, CECD y CECETS por mes para el FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, al interior de la oficina de la dirección del IER-UNAM.

Mes	$FD_{CEEA} - FD_{CE}$			$FCV_{CEEA} - FCV_{CE}$		
	CESTS	CECD	CECETS	CESTS	CECD	CECETS
Ene	0.5	0.4	0.4	-0.8	-0.8	-0.7
Feb	0.4	0.4	0.3	-1.9	-1.9	-1.9
Mar	0.3	0.2	0.3	-4.0	-3.9	-4.1
Abr	0.5	0.1	0.6	-6.6	-6.2	-6.7
May	0.5	0.1	0.5	-7.0	-6.5	-7.0
Jun	0.6	0.2	0.7	-6.8	-6.4	-6.9
Jul	0.9	0.3	1.0	-7.4	-6.9	-7.4
Ago	0.9	0.4	1.0	-6.5	-6.1	-6.5
Sep	0.6	0.3	0.7	-4.2	-4.1	-4.3
Oct	0.6	0.5	0.5	-2.2	-2.2	-2.3
Nov	0.4	0.3	0.3	-1.1	-1.1	-1.2
Dic	0.5	0.5	0.4	-1.1	-1.0	-1.0

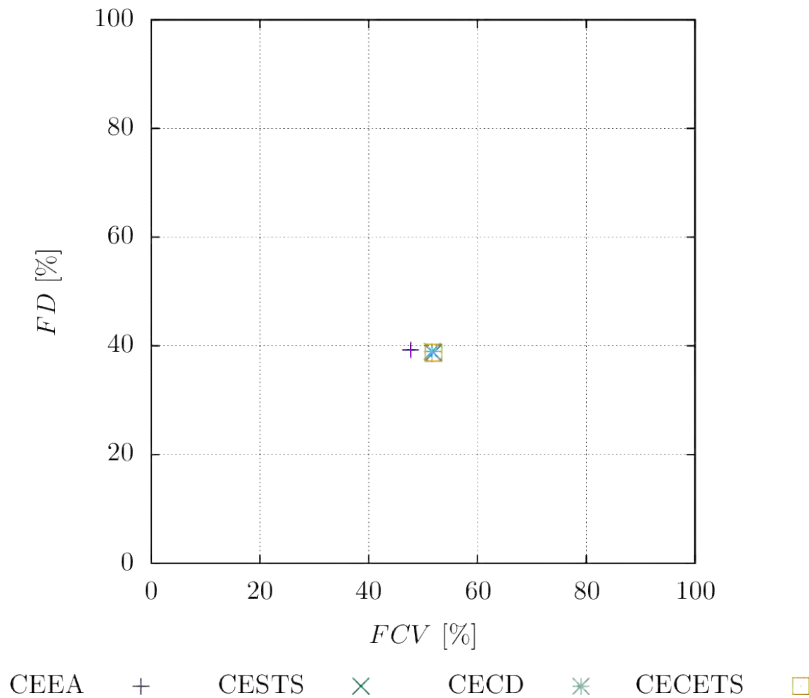


Figura 4.28: Evaluación del desempeño lumínico y térmico al interior del caso de estudio promedio anual. Para la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 750 \text{ lx}$, para el CEEA, CESTS, CECD y CECETS.

representan un decremento en el desempeño lumínico y los valores negativos una mejora. Para la evaluación de la oficina de la dirección los rangos utilizados para la FCV son de $E_{LL} = 150 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 750 \text{ lx}$. El CESTS es el que arroja un mejor comportamiento, principalmente para el mes de julio, que, comparado con el CEEA, presenta una variación de siete puntos porcentuales para la FCV y un punto porcentual para el FD .

En la Figura 4.28 se presenta el promedio anual del FD y la FCV del desempeño térmico y lumínico al interior de cada uno de los casos de estudio. Se puede observar que los casos CESTS, CECD y CECETS se encuentran sobrepuestos en el límite de la zona 1 con la zona 3, a diferencia del CEEA que se localiza ligeramente cargado hacia la zona 1. Los cuatro casos presentan una tendencia de mayor FD estando con valores promedio del 40 %.

En la Tabla 4.7 se presentan los valores correspondientes al promedio anual de cada caso junto con la desviación estándar, para el FD y la FCV .

Tabla 4.7: Datos de los porcentajes promedio por año del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), de los casos CEEA, CESTS, CECD, y CECETS.

Caso de Estudio.	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
CEEA	39.26	7.64	47.70	13.89
CESTS	38.71	7.52	51.84	16.08
CECD	38.96	7.55	51.64	15.97
CECETS	38.70	7.58	51.89	16.12

Para el CESTS, CECD y CECETS el FD disminuye casi un 1 % y la FCV aumenta casi un 4 % en relación al CEEA.

En la Figura 4.29 se presentan las evaluaciones del desempeño térmico y lumínico para el área de trabajo (AT) para cada uno de los casos con $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, como lo estableció Sicurella *et al.* [33], con valores promedio por cada mes (enero a diciembre) a lo largo de un año del FD y de la FCV . Las variaciones entre los cuatro casos son mínimas. A diferencia de las evaluaciones de la totalidad del espacio de la oficina de la dirección del IER-UNAM al interior de cada uno de los casos, en los resultados de las evaluaciones acotadas sobre el área de trabajo, los cuatro casos se localizan hacia la parte superior de la zona 1 (baja frecuencia de confort visual y bajo factor de decremento), manteniendo un patrón de comportamiento a lo largo de los meses (enero-diciembre), sin embargo para el CEEA se incrementa el hacinamiento de los puntos, esto resultado de la incidencia de iluminación a través del tubo solar localizado sobre el área de trabajo delimitada. A diferencia del CEEA, los casos CESTS, CECD y CECETS presentan una ligera mejora para los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto. Se puede apreciar que los meses con una mayor FCV son mayo, junio y julio, siendo julio el mes más alto, y que los meses en los que se presenta un mayor FD son diciembre y enero siendo enero el mes más alto, consecuencia de la orientación de la fachada sur en donde se encuentra la ventana y la inclinación del sol para el mes de enero.

En las Tablas 4.8 y 4.9 se presentan los valores correspondiente a los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente

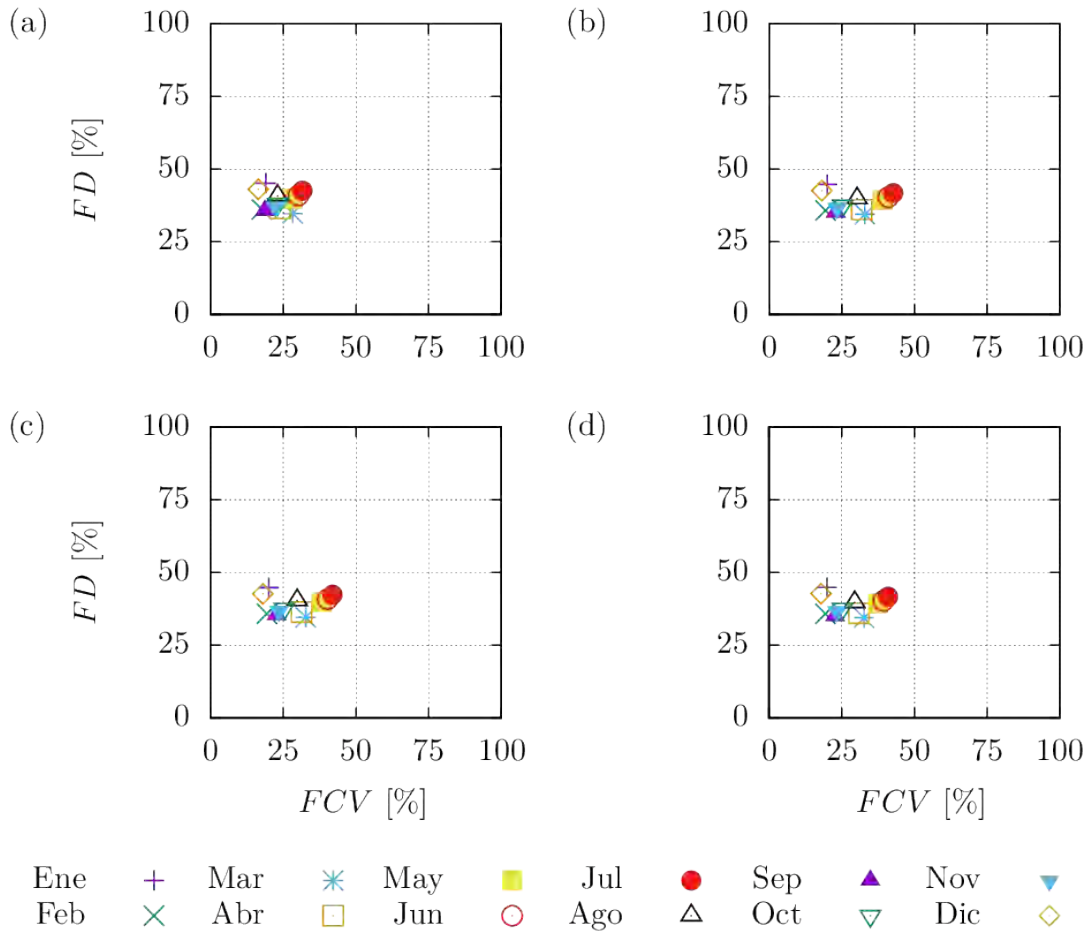


Figura 4.29: Evaluación del desempeño lumínico y térmico sobre el área de trabajo (AT) del caso de estudio por cada mes a lo largo del año. Para la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.

Tabla 4.8: Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}) en el área de trabajo (AT) para los casos CEEA, y CESTS.

Mes	CEEA				CESTS			
	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
Ene	45.18	10.28	18.97	13.95	44.71	10.22	20.00	13.14
Feb	36.09	3.93	17.57	9.24	35.73	3.88	19.41	9.52
Mar	34.76	3.48	28.19	16.30	34.46	3.45	32.96	18.89
Abr	36.49	3.70	23.88	17.21	36.01	3.67	31.83	22.43
May	39.81	11.93	28.23	16.93	39.35	11.84	38.98	21.70
Jun	40.95	6.64	30.16	19.27	40.35	6.58	40.98	23.70
Jul	42.61	5.82	31.57	21.78	41.76	5.64	42.71	26.28
Ago	40.75	5.91	23.01	19.19	39.83	5.76	30.23	21.29
Sep	35.62	3.24	18.63	14.36	35.04	3.23	22.89	16.51
Oct	38.11	9.72	23.10	13.57	37.54	9.50	25.28	14.27
Nov	37.08	4.10	22.37	11.62	36.68	3.95	23.39	11.43
Dic	43.10	6.74	16.36	10.35	42.58	6.65	18.11	11.64

Tabla 4.9: Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y la FCV con un rango de $E_{LL} = 150lx$ y $E_{UL} = 750lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), en el área de trabajo (AT) para los casos CECD, y CECETS.

Mes	CECD				CECETS			
	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
Ene	44.77	10.20	20.03	13.20	44.81	10.28	19.94	13.25
Feb	35.78	3.86	19.39	9.56	35.81	3.92	19.36	9.59
Mar	34.57	3.44	32.74	18.61	34.42	3.46	32.65	18.77
Abr	36.36	3.65	31.34	22.04	35.94	3.67	30.93	21.82
May	39.70	11.90	38.26	21.47	39.33	11.94	37.49	21.04
Jun	40.78	6.62	40.23	23.48	40.27	6.62	39.36	23.01
Jul	42.34	5.72	41.95	26.13	41.61	5.64	40.92	25.39
Ago	40.36	5.84	29.78	21.08	39.71	5.83	29.42	21.01
Sep	35.29	3.24	22.75	16.37	34.93	3.24	22.74	16.58
Oct	37.60	9.47	25.29	14.31	37.59	9.65	25.22	14.38
Nov	36.76	3.94	23.47	11.49	36.74	4.00	23.37	11.44
Dic	42.64	6.62	18.02	11.65	42.72	6.70	17.90	11.57

Tabla 4.10: Diferencia de los porcentajes promedio entre el CEEA y cada caso de estudio (CE). Casos CESTS, CECD y CECETS por mes para el FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, en el área de trabajo (AT).

Mes	$FD_{CEEA} - FD_{CE}$			$FCV_{CEEA} - FCV_{CE}$		
	CESTS	CECD	CECETS	CESTS	CECD	CECETS
Ene	0.5	0.4	0.4	-1.0	-1.1	-1.0
Feb	0.4	0.4	0.3	-1.8	-1.8	-1.8
Mar	0.3	0.2	0.3	-4.8	-4.6	-4.5
Abr	0.5	0.1	0.6	-8.0	-7.5	-7.1
May	0.5	0.1	0.5	-10.8	-10	-9.3
Jun	0.6	0.2	0.7	-10.8	-10.1	-9.2
Jul	0.9	0.3	1.0	-11.1	-10.4	-9.4
Ago	0.9	0.4	1.0	-7.2	-6.8	-6.4
Sep	0.6	0.3	0.7	-4.3	-4.1	-4.1
Oct	0.6	0.5	0.5	-2.2	-2.2	-2.1
Nov	0.4	0.3	0.3	-1.0	-1.1	-1.0
Dic	0.5	0.5	0.4	-1.8	-1.7	-1.5

(σ_{FD} y σ_{FCV}), sobre el área de trabajo para cada uno de los casos, CEEA, CESTS, CECD y CECETS; en donde puede observarse que la variación entre el CEEA y los otros tres casos, es de once puntos porcentuales para la FCV y un punto porcentual para el FD .

En la Tabla 4.10 se presentan las diferencias de los porcentajes promedio por cada mes en el área de trabajo (AT) para el FD y la FCV entre el CEEA y los casos de estudio CESTS, CECD y CECETS. Para el FD una diferencia positiva representa una mejora y los valores negativos una baja en el desempeño térmico; al contrario de lo que ocurre para la FCV en donde los valores positivos representan un decremento en el desempeño lumínico y los valores negativos una mejora. Para la evaluación del área de trabajo (AT) los rangos utilizados para la FCV son de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$. El CESTS es el que arroja un mejor comportamiento, principalmente para el mes de julio, que, comparado con el CEEA, presentan una variación de once puntos porcentuales para la FCV y un punto porcentual para el FD .

En la Figura 4.30 se presenta el promedio anual del FD y la FCV del

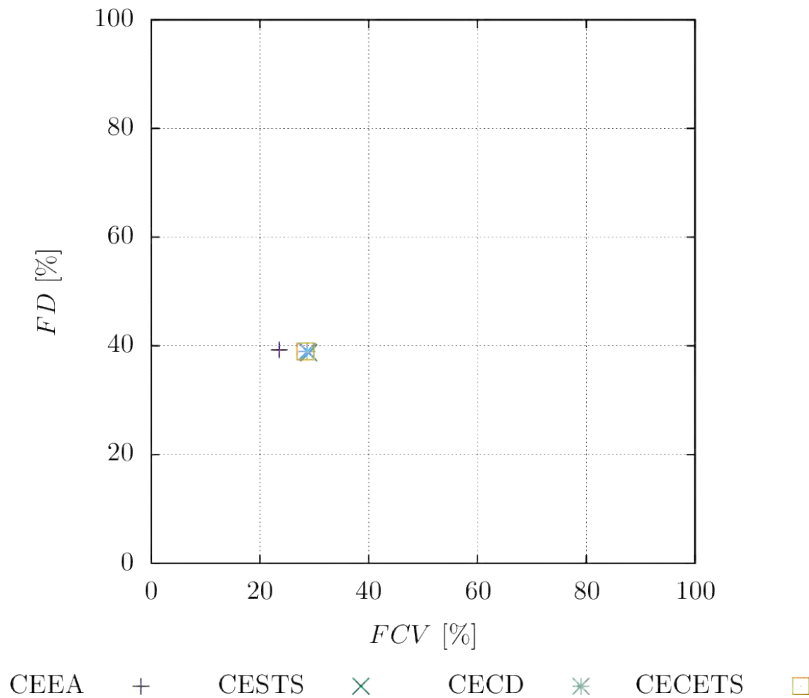


Figura 4.30: Evaluación del desempeño lumínico y térmico sobre el área de trabajo (AT) del caso de estudio promedio anual. Para la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$, para los casos CEEA, CESTS, CECD y CECETS.

desempeño térmico y lumínico en el área de trabajo (AT) de cada uno de los casos de estudio. Se puede notar que los casos CESTS, CECD y CECETS se encuentran sobrepuestos en la zona 1, cargados hacia la zona 2. Los cuatro casos presentan una tendencia de mayor FD estando con valores promedio del 40 %.

En la Tabla 4.11 se presentan los valores correspondientes al promedio anual de cada caso en el área de trabajo (AT) junto con la desviación estándar, para el FD y la FCV . Para el CESTS, CECD y CECETS el FD disminuye casi un 1 % y la FCV aumenta casi un 6 % en relación al CEEA.

En la Figura 4.31 se presentan las evaluaciones del desempeño térmico y lumínico para todo el espacio al interior de la oficina para cada uno de los casos con $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$, de acuerdo a los rangos propuestos en esta tesis, con valores promedio por cada mes (enero a diciembre) a lo largo de un año del FD y de la FCV . Las variaciones entre los cuatro casos

Tabla 4.11: Datos de los porcentajes promedios por año del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 150 lx$ y $E_{UL} = 750 lx$ junto con su desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), en el área de trabajo para los casos CEEA, CESTS, CECD, y CECETS.

Caso de Estudio	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
CEEA	39.26	7.64	23.55	16.52
CESTS	38.71	7.52	28.97	20.19
CECD	38.96	7.55	28.67	19.94
CECETS	38.70	7.58	28.34	19.65

son mínimas. En los cuatro casos la totalidad de los meses se localizan en la zona 3 (alta frecuencia de confort visual y bajo factor de decremento), siendo ésta la zona esperada, sin embargo los meses de enero, noviembre y diciembre están ligeramente cargados hacia la zona 1 (baja frecuencia de confort visual y bajo factor de decremento). Para los cuatro casos, se puede observar que los meses con una mayor FCV son abril, mayo, junio y julio, y que los meses en los que se presenta un mayor FD son enero y diciembre, siendo enero el mes más alto, consecuencia de la orientación de la fachada sur en donde se encuentra la ventana y la inclinación del sol para el mes de enero. De acuerdo a la mejora esperada el mes de abril se considera el más adecuado teniendo una mayor FCV y un menor FD .

En las Tablas 4.12 y 4.13 se presentan los valores correspondientes a los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), para cada uno de los casos, CEEA, CESTS, CECD y CECETS; en donde se pueden observar que las variaciones entre los cuatro casos son mínimas, del orden de los decimales. Los meses de abril y agosto presentan una mayor FCV , y los meses de marzo y septiembre un menor FD .

En la Tabla 4.14 se presentan las diferencias de los porcentajes promedio por cada mes para el FD y la FCV entre el CEEA y los casos de estudio CESTS, CECD y CECETS. Para el FD una diferencia positiva representa una mejora y los valores negativos una baja en el desempeño térmico; al contrario de lo que ocurre para la FCV en donde los valores positivos representan un decremento en el desempeño lumínico y los valores negativos una mejora. Para la evaluación de la oficina de la dirección los rangos

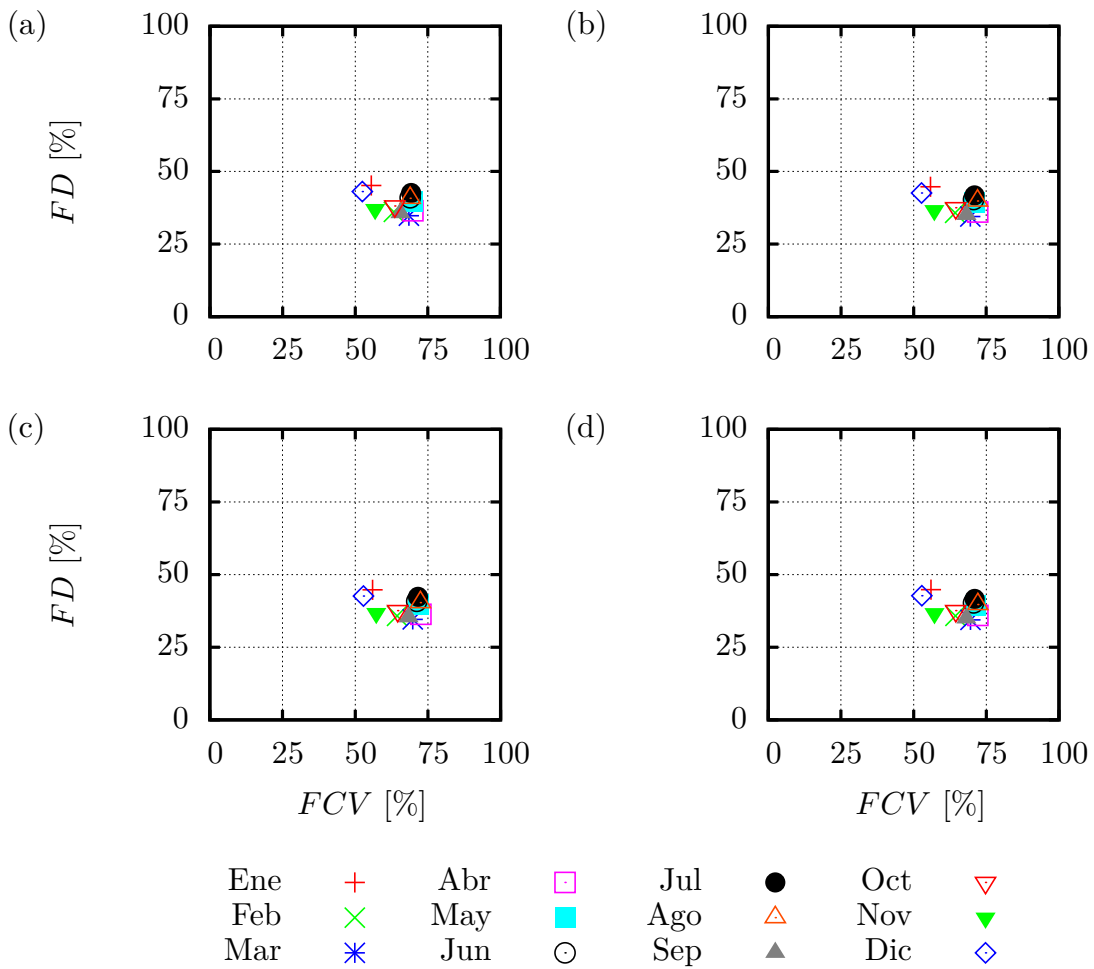


Figura 4.31: Evaluación del desempeño lumínico y térmico al interior del caso de estudio por cada mes a lo largo del año. Para la FVC , con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.

Tabla 4.12: Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con su desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), de los casos CEEA, y CESTS.

Mes	CEEA				CESTS			
	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
Ene	45.18	10.28	55.51	8.45	44.71	10.20	55.82	8.69
Feb	36.09	3.93	63.29	6.77	35.73	3.80	64.31	6.16
Mar	34.76	3.48	68.48	6.48	34.46	3.45	69.51	5.31
Abr	36.49	3.70	69.86	4.81	36.01	3.67	72.08	5.43
May	39.81	11.93	69.61	4.58	39.35	11.84	71.04	6.67
Jun	40.95	6.64	68.92	4.88	40.35	6.58	70.61	8.26
Jul	42.61	5.82	69.23	4.34	41.76	5.64	70.94	9.06
Ago	40.75	5.91	68.90	7.22	39.83	5.76	72.03	8.84
Sep	35.62	3.24	65.56	4.30	35.04	3.23	68.20	3.33
Oct	38.11	9.72	63.64	7.94	37.54	9.50	64.52	7.63
Nov	37.08	4.10	56.85	5.34	36.68	3.95	57.14	4.72
Dic	43.10	6.74	52.46	5.01	42.58	6.65	52.74	4.64

Tabla 4.13: Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con su desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}) de los casos CECD, y CECETS.

Mes	CECD				CECETS			
	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
Ene	44.77	10.20	55.94	8.66	44.81	10.28	55.95	8.67
Feb	35.78	3.86	64.37	6.17	35.81	3.92	64.41	6.21
Mar	34.57	3.44	69.77	5.52	34.42	3.46	69.54	5.31
Abr	36.36	3.65	72.60	5.13	35.94	3.67	72.07	5.47
May	39.70	11.90	71.62	6.38	39.33	11.94	71.14	6.67
Jun	40.78	6.62	71.15	7.80	40.27	6.62	70.63	8.21
Jul	42.34	5.72	71.60	8.34	41.61	5.64	71.01	9.00
Ago	40.36	5.84	72.42	8.78	39.71	5.83	72.07	8.87
Sep	35.29	3.24	68.34	3.39	34.93	3.24	68.15	3.23
Oct	37.60	9.47	64.58	7.66	37.59	9.65	64.52	7.63
Nov	36.76	3.94	57.21	4.76	36.74	4.00	57.20	4.73
Dic	42.64	6.62	52.86	4.62	42.72	6.70	52.84	4.64

Tabla 4.14: Diferencia de los porcentajes promedio entre el CEEA y cada caso de estudio (CE). Casos CESTS, CECD y CECETS por mes para el FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$, al interior de la oficina de la dirección del IER-UNAM.

Mes	$FD_{CEEA} - FD_{CE}$			$FCV_{CEEA} - FCV_{CE}$		
	CESTS	CECD	CECETS	CESTS	CECD	CECETS
Ene	0.5	0.4	0.4	-0.3	-0.4	-0.4
Feb	0.4	0.4	0.3	-0.8	-0.9	-0.9
Mar	0.3	0.2	0.3	-1.0	-1.3	-1.1
Abr	0.5	0.1	0.6	-2.2	-2.7	-2.2
May	0.5	0.1	0.5	-1.4	-2.0	-1.5
Jun	0.6	0.2	0.7	-1.7	-2.2	-1.7
Jul	0.9	0.3	1.0	-1.7	-2.4	-1.8
Ago	0.9	0.4	1.0	-3.1	-3.5	-3.2
Sep	0.6	0.3	0.7	-2.6	-2.8	-2.6
Oct	0.6	0.5	0.5	-0.9	-0.9	-0.9
Nov	0.4	0.3	0.3	-0.3	-0.4	-0.4
Dic	0.5	0.5	0.4	-0.3	-0.4	-0.4

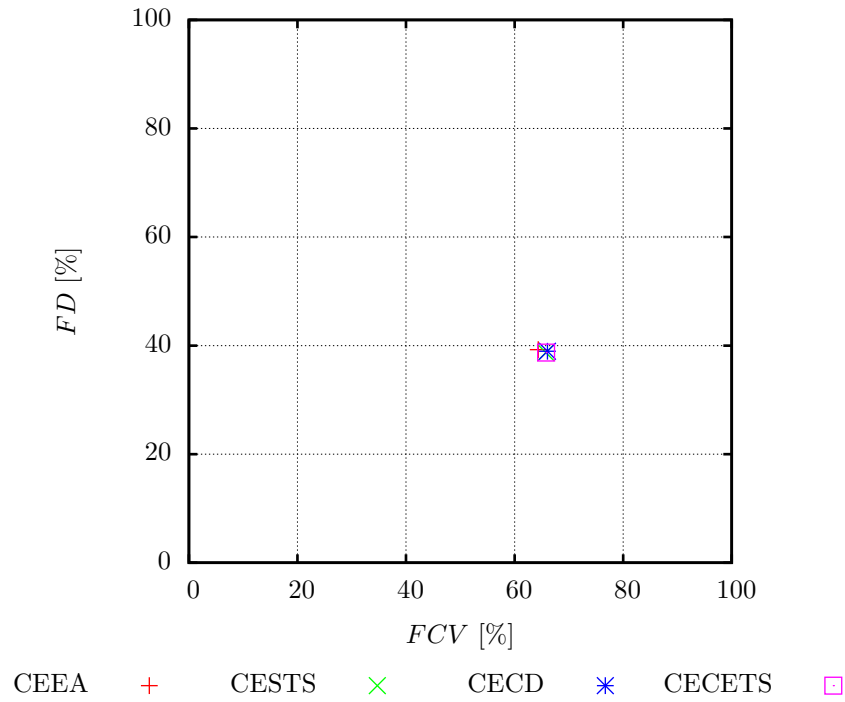


Figura 4.32: Evaluación del desempeño lumínico y térmico al interior del caso de estudio promedio anual. Para la FCV , con un rango de $E_{UL} = 300 \text{ lx}$ y $E_{LL} = 1500 \text{ lx}$ para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.

utilizados para la FCV son de $E_{LL} = 300 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 1500 \text{ lx}$. El CECD es el que arroja un mejor comportamiento, principalmente para el mes de agosto, que, comparado con el CEEA, presenta una variación de tres puntos porcentuales para la FCV y medio punto porcentual para el FD .

En la Figura 4.32 se presenta el promedio anual del FD y la FCV del desempeño térmico y lumínico al interior de cada uno de los casos de estudio. Se puede notar que los cuatro casos se encuentran sobrepuestos en la zona 3, superando una FCV del 60%. Los cuatro casos presentan una tendencia de mayor FD estando con valores promedio del 40%.

En la Tabla 4.15 se presentan los valores correspondientes al promedio anual de cada caso junto con la desviación estándar, para el FD y la FCV . Para el CESTS, CECD y CECETS el FD disminuye casi un 1% y la FCV aumenta casi un 2% en relación al CEEA.

En la Figura 4.33 se presentan las evaluaciones del desempeño térmi-

Tabla 4.15: Datos de los porcentajes promedio por año del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} , y σ_{FCV}), de los casos CEEA, CESTS, CECD, y CECETS.

Caso de Estudio.	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
CEEA	39.26	7.64	64.36	8.45
CESTS	38.71	7.52	65.74	9.52
CECD	38.96	7.55	66.04	9.53
CECETS	38.70	7.58	65.79	9.50

co y lumínico para el área de trabajo (AT) para cada uno de los casos con $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$, de acuerdo a los rangos propuestos en esta tesis, con valores promedio por cada mes (enero a diciembre) a lo largo de un año del FD y de la FCV . Las variaciones entre los cuatro casos son mínimas. A diferencia de las evaluaciones de la totalidad del espacio de la oficina de la dirección del IER-UNAM al interior de cada uno de los casos, en los resultados de las evaluaciones acotadas sobre el área de trabajo, en los cuatro casos, los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre se localizan en la zona 1 (baja frecuencia de confort visual y bajo factor de decremento) en los límites con la zona 3 (alta frecuencia de confort visual y bajo factor de decremento) y la zona 2 (baja frecuencia de confort visual y alto factor de decremento). A diferencia del CEEA, los casos CESTS, CECD y CECETS presentan una ligera mejora para los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto. Se puede observar que los meses con una mayor FCV son mayo, junio y julio, sin embargo los meses de marzo y abril presentan un menor FD ; y que los meses en los que se presenta un mayor FD son diciembre y enero siendo enero el mes más alto, consecuencia de la orientación de la fachada sur en donde se encuentra la ventana y la inclinación del sol para el mes de enero.

En las Tablas 4.16 y 4.17 se presentan los valores correspondientes a los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$, junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), sobre el área de trabajo (AT) para cada uno de los casos, CEEA, CESTS, CECD y CECETS; en donde se puede apreciar que las variaciones entre los cuatro casos son mínimas, del orden de los decimales. Los meses de mayo, junio y julio presentan una mayor FCV y los

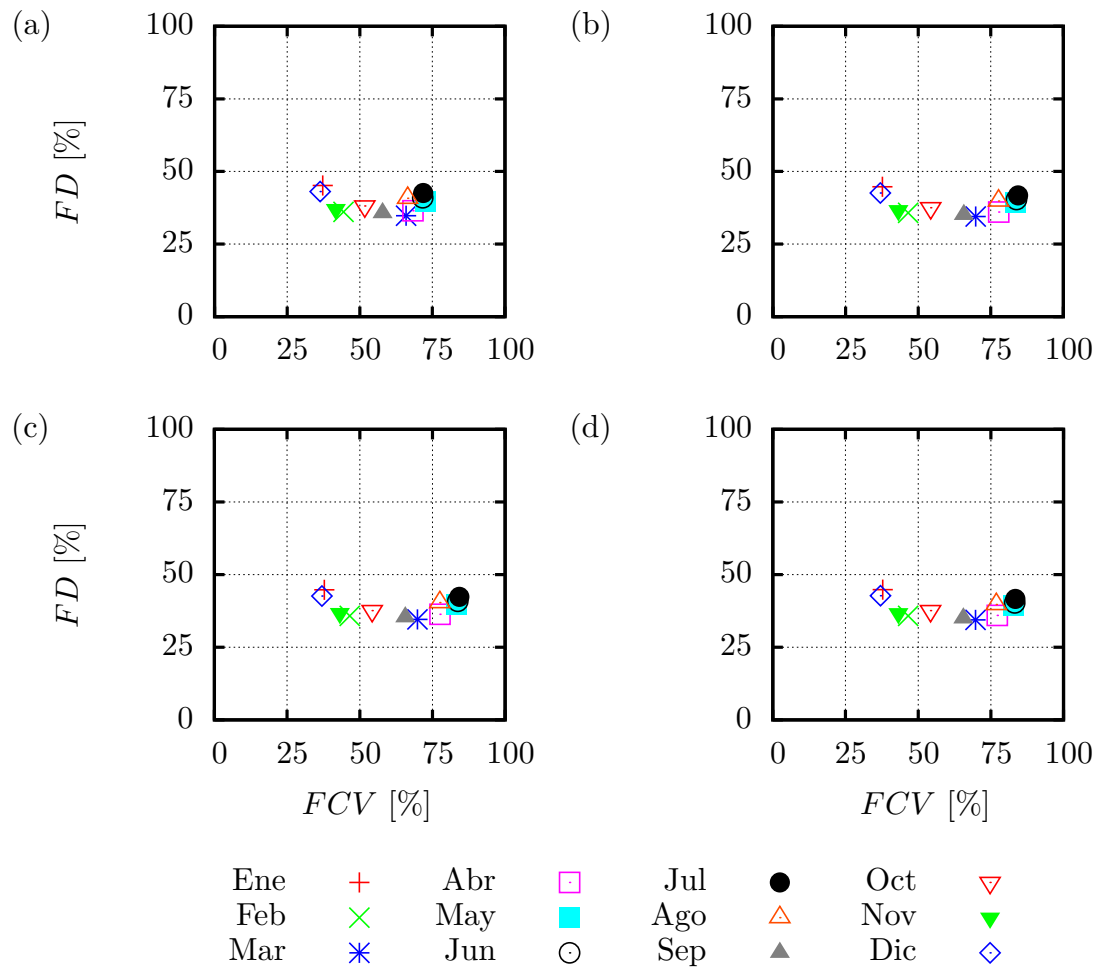


Figura 4.33: Evaluación del desempeño lumínico y térmico sobre el área de trabajo (AT) del caso de estudio por cada mes a lo largo del año. Para la FCV , con un rango de $E_{LL} = 300 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 1500 \text{ lx}$ para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD, (d) CECETS.

Tabla 4.16: Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con la desviación estándar correspondiente a $(\sigma_{FD}, \text{ y } \sigma_{FCV})$ en el área de trabajo (AT) para los casos CEEA, y CESTS.

Mes	CEEA				CESTS			
	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FD}	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FD}
Ene	45.18	10.28	37.22	10.11	44.71	10.22	37.65	9.64
Feb	36.09	3.93	44.38	14.61	35.73	3.88	46.54	13.85
Mar	34.76	3.48	65.92	21.58	34.46	3.45	69.81	18.35
Abr	36.49	3.70	68.31	16.17	36.01	3.67	77.75	12.78
May	39.81	11.93	72.59	13.04	39.35	11.84	83.43	9.39
Jun	40.95	6.64	71.70	10.77	40.35	6.58	83.87	7.58
Jul	42.61	5.82	71.82	10.78	41.76	5.64	84.38	7.46
Ago	40.75	5.91	66.48	12.84	39.83	5.76	77.70	11.00
Sep	35.62	3.24	57.84	15.11	35.04	3.23	65.74	11.93
Oct	38.11	9.72	51.70	17.00	37.54	9.50	54.34	15.15
Nov	37.08	4.10	41.78	13.06	36.68	3.95	43.20	12.92
Dic	43.10	6.74	36.38	14.53	42.58	6.65	36.95	13.99

Tabla 4.17: Datos de los porcentajes promedio por mes del FD y la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), en el área de trabajo (AT) para los casos CECD, y CECETS.

Mes	CECD				CECETS			
	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
Ene	44.77	10.20	37.80	9.71	44.81	10.28	37.81	9.79
Feb	35.78	3.86	46.58	13.91	35.81	3.92	46.53	14.02
Mar	34.57	3.44	69.83	18.32	34.42	3.46	69.70	18.57
Abr	36.36	3.65	77.58	12.84	35.94	3.67	77.24	12.73
May	39.70	11.90	83.33	9.44	39.33	11.94	82.71	9.38
Jun	40.78	6.62	83.71	7.63	40.27	6.62	83.20	7.54
Jul	42.34	5.72	84.24	7.54	41.61	5.64	83.43	7.34
Ago	40.36	5.84	77.53	11.00	39.71	5.83	76.86	10.70
Sep	35.29	3.24	65.64	11.99	34.93	3.24	65.53	12.19
Oct	37.60	9.47	54.28	15.10	37.59	9.65	54.25	15.20
Nov	36.76	3.94	43.17	12.93	36.74	4.00	43.22	12.94
Dic	42.64	6.62	36.97	13.94	42.72	6.70	37.02	14.01

Tabla 4.18: Diferencia de los porcentajes promedio entre el CEEA y cada caso de estudio (CE). Casos CESTS, CECD y CECETS por mes para el FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$, en el área de trabajo (AT).

Mes	$FD_{CEEA} - FD_{CE}$			$FCV_{CEEA} - FCV_{CE}$		
	CESTS	CECD	CECETS	CESTS	CECD	CECETS
Ene	0.5	0.4	0.4	-0.4	-0.6	-0.6
Feb	0.4	0.4	0.3	-2.2	-2.2	-2.2
Mar	0.3	0.2	0.3	-3.9	-3.9	-3.8
Abr	0.5	0.1	0.6	-9.4	-9.3	-8.9
May	0.5	0.1	0.5	-10.8	-10.7	-10.1
Jun	0.6	0.2	0.7	-12.2	-12.0	-11.5
Jul	0.9	0.3	1.0	-12.6	-12.4	-11.6
Ago	0.9	0.4	1.0	-11.2	-11.1	-10.4
Sep	0.6	0.3	0.7	-7.9	-7.8	-7.7
Oct	0.6	0.5	0.5	-2.6	-2.6	-2.6
Nov	0.4	0.3	0.3	-1.4	-1.4	-1.4
Dic	0.5	0.5	0.4	-0.6	-0.6	-0.6

meses de febrero, marzo y septiembre un menor FD .

En la Tabla 4.18 se presentan las diferencias de los porcentajes promedio por cada mes en el área de trabajo (AT) para el FD y la FCV entre el CEEA y los casos de estudio CESTS, CECD y CECETS. Para el FD una diferencia positiva representa una mejora y los valores negativos una baja en el desempeño térmico; al contrario de lo que ocurre para la FCV en donde los valores positivos representan un decremento en el desempeño lumínico y los valores negativos una mejora. Para la evaluación del área de trabajo (AT) los rangos utilizados para la FCV son de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$. El CESTS es el que arroja un mejor comportamiento, principalmente para el mes de julio, que, comparado con el CEEA, presenta una variación de doce puntos porcentuales para la FCV y un punto porcentual para el FD .

En la Figura 4.34 se presenta el promedio anual del FD y la FCV del desempeño térmico y lumínico en el área de trabajo (AT) de cada uno de los casos de estudio. Se puede observar una ligera mejora sobre la FCV para los casos CESTS, CECD y CECETS, no así para el FD , en donde los

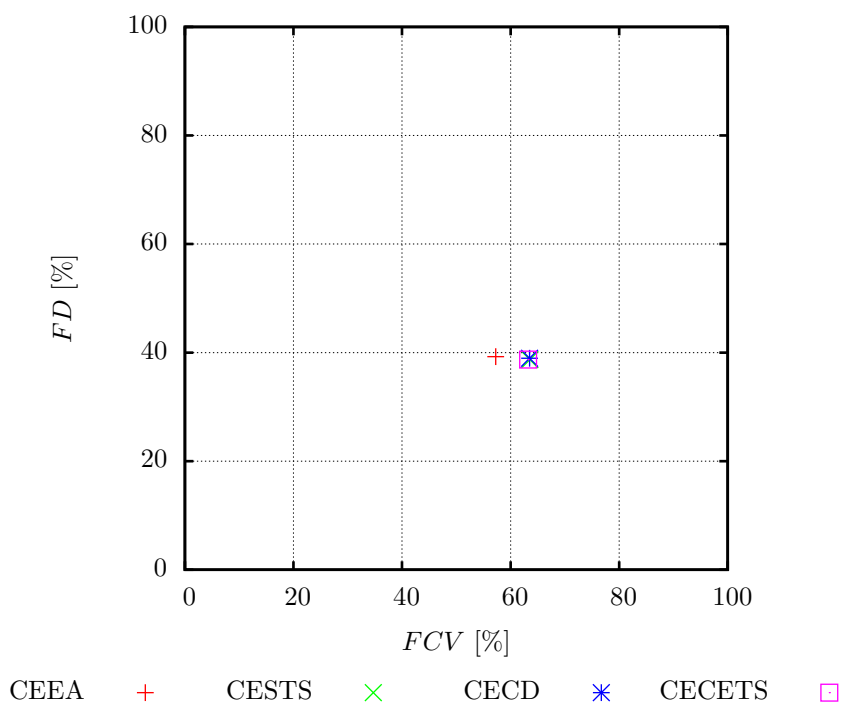


Figura 4.34: Evaluación del desempeño lumínico y térmico sobre el área de trabajo (AT) del caso de estudio promedio anual. Para la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ para el (a) CEEA, (b) CESTS, (c) CECD y (d) CECETS.

cuatro casos presentan un tendencia de mayor estando con valores promedio del 40 %.

En la Tabla 4.19 se presentan los valores correspondientes al promedio anual de cada caso en el área de trabajo (AT) junto con la desviación estándar, para el FD y la FCV . Para el CESTS, CECD y CECETS el FD disminuye casi un 1 % y la FCV aumenta casi un 6 % en relación al CEEA.

Tabla 4.19: Datos de los porcentajes promedio por año del FD y de la FCV con un rango de $E_{LL} = 300 lx$ y $E_{UL} = 1500 lx$ junto con la desviación estándar correspondiente (σ_{FD} y σ_{FCV}), en el área de trabajo (AT) para cada caso CEEA, CESTS, CECD, y CECETS.

Caso de Estudio	FD	σ_{FD}	FCV	σ_{FCV}
CEEA	39.26	7.64	57.25	19.85
CESTS	38.71	7.52	63.54	21.80
CECD	38.96	7.55	63.48	21.75
CECETS	38.70	7.58	63.22	21.55

Capítulo 5

Conclusiones

En esta tesis se realizó el estudio de la iluminación natural y el desempeño térmico de la oficina de la dirección del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, con un tubo solar instalado en la cubierta, definido éste, como caso de estudio y de tres casos más. El estudio se llevó a cabo utilizando OpenStudio como interfaz de Radiance y EnergyPlus para la parte de iluminación y del desempeño térmico, respectivamente. Primero, se llevó a cabo una validación del uso de OpenStudio como interfaz del programa Radiance comparando cualitativamente el trabajo realizado por Christian *et al.* [29], en donde presentan un programa elaborado por ellos de trazado de rayos y reportan la validación del programa con los datos experimentales de los niveles de iluminación a lo largo de un cuarto con mediciones a cada metro, con los resultados de una simulación utilizando SketchUp y OpenStudio considerando los mismos parámetros definidos en la literatura por Christian *et al.* [29]. Como siguiente paso, se realizaron mediciones experimentales de los niveles de iluminación en un punto fijo sobre un tubo solar instalado en la cubierta del caso de estudio a lo largo de un día, y se compararon con los resultados obtenidos de la simulación de la representación gráfica digital en SketchUp del caso de estudio a partir del levantamiento del mismo usando OpenStudio como interfaz de Radiance. En la primera comparación, se encontró una variación en los resultados con base en una hora de diferencia (entre las 14:00 y 15:00 horas)

y 5 días (del día 260 juliano al 265 juliano), utilizando un archivo de clima descargado del sitio web de EnergyPlus Weather Data by Region [58], para la Europe WMO Region 6 - Denmark - Copenhagen, año 2009, un año típico de Dinamarca. El comportamiento de los resultados a lo largo de la línea central del espacio es muy similar. En la segunda comparación, utilizando mediciones experimentales, se encontró un error relativo promedio de 21 % sin considerar el árbol existente y de 5 % considerando el árbol.

Se simularon cuatro casos de estudio; el primero, el caso de estudio estado actual CEEA, a partir de las dimensiones y características presentadas en el levantamiento, se simula la oficina de la dirección del IER-UNAM usando Radiance y EnergyPlus, tomando en cuenta la ventana existente en la fachada sur y el tubo solar en la cubierta inclinada, considerando los edificios colindantes, los árboles existentes como elementos de sombreado, la orientación y los cuatro sistemas constructivos existentes. El segundo, el caso de estudio sin tubo solar CESTS, que se simula a partir de un modelo con las mismas características de la oficina de la dirección del IER-UNAM, suprimiendo la existencia del tubo solar en la cubierta inclinada. El tercero, el caso de estudio con difusor CECD, que se simula a partir de un modelo con las mismas características de la oficina de la dirección del IER-UNAM, modificando los parámetros del vidrio utilizado para simular el tubo solar, se define como un vidrio que convierte el 100 % de la radiación transmitida en luz difusa. Y el cuarto, el caso de estudio con extensión de tubo solar CECETS, que se simula a partir de un modelo con las mismas características de la oficina de la dirección del IER-UNAM, generando una extensión del tubo solar igualando la altura del edificio colindante al este y el vidrio que transmite la luz de manera difusa. En los cuatro casos de estudio se mantuvieron fijas las propiedades térmicas de los materiales, los parámetros de los sistemas constructivos, la absorción solar de los acabados, la ventana existente en fachada sur, el árbol existente; modificando únicamente el tubo solar a partir del difusor y tamaño.

Para el análisis de los resultados, se generaron dos esquemas de mapas de iluminancia para cada caso: el primero considera 12 días del año, uno correspondiente a cada mes, reportando las mediciones a las 12:00 horas tiempo solar. El segundo considera el día 209 juliano por ser uno de los días en el cual el sol pasa por el cenit, y se presentan cada hora de las 7:00 a las 18:00 horas. Los mapas de iluminancia analizados en cada uno de los casos de estudio proceden de una malla de $4.00\text{ m} \times 5.00\text{ m}$ a una altura de 0.76 m . Los mapas de iluminancia, muestran que en el CEEA la pre-

sencia de la marca resultado de la transmisión de radiación directa por el tubo solar con valores superiores a los 3000 lx , está en 7 de los 12 meses (marzo - septiembre), lo que representa más del 50 % del año; a diferencia de lo que muestran los mapas de iluminancia para el CESTS, el CECD y el CECETS en donde no se tiene presencia de la marca. Además en todos los casos la iluminación natural se genera mayormente cerca del área de la ventana, resultado de la orientación de la ventana (fachada sur), con valores superiores a los 3000 lx en algunas horas, de manera uniforme en una superficie cercana al primer metro contiguo al paramento de la ventana. Los resultados para el segundo esquema de mapas de iluminancia correspondientes a uno de los días en el que el sol pasa por el cenit, muestran que en el CEEA a partir de las 10:00 horas se puede observar la incidencia de radiación directa a través del tubo solar, con niveles de iluminación mayores a los 8000 lx ; esta marca de radiación directa se mantiene presente hasta las 13:00 horas, con un recorrido de acuerdo a la trayectoria aparente del sol sobre el plano horizontal. A diferencia de lo que muestran los mapas de iluminancia para el CESTS, el CECD y el CECETS no se tiene presencia de la marca. En todos los mapas de iluminancia siempre se ve la influencia de la ventana desde las 8:00 hasta las 17:00 horas.

La primera conclusión a partir del análisis y comparación de los mapas de iluminancia para los cuatro casos de estudio, fue que en el CESTS, CECD y CECTS, existe una mejora en la uniformidad de la iluminación al interior de la oficina, eliminando las marcas generadas por el tubo solar que presenta el CEEA. Por lo que el siguiente paso consistió en determinar la mejora, evaluando la iluminación natural y el desempeño térmico de los cuatro casos de estudio en términos de tres parámetros, con un horario de evaluación de las 8:00 a las 18:00 h . El primer parámetro es el Iluminancia Útil de Luz Natural UDI , a partir de tres valores, el UDI_- que representa el porcentaje del tiempo cuando el nivel de iluminación es demasiado bajo, correspondiente a una subiluminación; el UDI_u que representa el porcentaje del tiempo con el valor de iluminación adecuado; y el UDI_+ que representa el porcentaje del tiempo cuando existe un exceso de provisión de luz natural, correspondiente a una sobreiluminación. El segundo parámetro es el Factor de Decremento FD , que indica el amortiguamiento de la amplitud de la oscilación de la temperatura del aire al interior con respecto a la temperatura exterior. Y el tercer parámetro es la Frecuencia de Confort Visual FCV , que indica el promedio del porcentaje del tiempo durante el cuál la luz natural se encuentra en el rango de

valores apropiados de iluminancia para un periodo de tiempo en una superficie definida.

Para los parámetros de iluminación se utilizaron dos rangos de medición, el primero establecido por Sicurella *et al.* [33] con un límite inferior de iluminancia $E_{LL} = 150 lx$ y un límite superior de iluminancia $E_{UL} = 750 lx$; y el segundo rango sugerido en esta tesis conforme los niveles mínimos de iluminación requeridos que establece la NOM-025-STPS-2008 [8] de acuerdo a cada actividad visual, con un límite inferior de iluminancia $E_{LL} = 300 lx$ correspondiente a un nivel mínimo de iluminación de una tarea visual para trabajos de oficina y un límite superior de iluminancia $E_{UL} = 1500 lx$, correspondiente a un nivel promedio de iluminación de una tarea visual para trabajos de alta exactitud; correspondiendo, a su vez, este valor (1500 lx) a los niveles superiores de iluminancia promedio registrados en las mediciones experimentales al interior del caso de estudio.

Conforme el primer rango de medición, los resultados de la evaluación con el *UDI* a partir de los CESTS, CECD y CECETS como casos de propuesta de mejora, reportan un porcentaje de tiempo mucho menor, en comparación con el segundo rango de medición, en el cuál el espacio se encuentra en los valores adecuados de iluminación. Para el segundo rango de medición, los resultados reportan que casi la totalidad del tiempo el espacio analizado se encuentra iluminado adecuadamente, a diferencia de los resultados con el primer rango de medición en donde se reporta la mitad del tiempo iluminado adecuadamente sobre el tercio superior del espacio y subiluminado en el tercio intermedio y el tercio inferior del espacio, esto debido a que está evaluado con un rango más pequeño.

Por lo anterior, se genera la segunda conclusión en donde se encontró que al cambiar al rango propuesto por esta tesis para los límites de iluminancia el espacio está iluminado adecuadamente la mayor parte del tiempo, y se presenta una sobreiluminación en el tercio inferior del espacio cercano a la ventana existente en fachada sur la mayor parte del tiempo; a partir de los resultados se concluye que el discomfort existente sobre el área de trabajo al interior de la oficina se debe a los niveles de iluminación por contraste generados por la presencia del tubo solar instalado en la cubierta, ya que conforme a los resultados del CESTS, CECD y CECETS la presencia del tubo solar, reduce en un 20% del tiempo los niveles de iluminación adecuados.

Para efecto de la evaluación con el *FD* y la *FCV* de los cuatro casos de estudio, y con el objetivo de realizar la evaluación de estrategias de mejora

en los niveles de iluminación y el desempeño térmico, se delimitaron dos superficies para la *FCV*: la primera considera la totalidad del área de la oficina de la dirección del IER-UNAM ($4 \times 5 \text{ m}$), la segunda considera el área de trabajo sobre el escritorio dentro de la oficina ($2 \times 2.5 \text{ m}$); para el *FD* se considera el volumen total del espacio, caso de estudio, conforme los cuatro sistemas constructivos existentes y las propiedades térmicas de los materiales.

De acuerdo al resultado de las evaluaciones en la comparación del *FD* y la *FCV* al interior del caso de estudio con los rangos establecidos por Sicurella *et al.* [33] se observa que existe una diferencia promedio anual del 4.1 % de mejora en la *FCV* para el CESTS, del 3.9 % para el CECD y del 5.2 % para el CECETS y el CEEA; mientras que para el *FD* la mejora es del 0.5 % para el CESTS, del 0.3 % para el CECD y del 0.6 % para el CECETS. En los resultados en el área de trabajo con los rangos establecidos por Sicurella *et al.* [33], existe una diferencia promedio anual del 5.4 % de mejora en la *FCV* para el CESTS, del 5.1 % para el CECD y del 4.8 % para el CECETS, y el CEEA; mientras que para el *FD* la mejora es del 0.5 % para el CESTS del 0.3 % para el CECD y del 0.6 % para el CECETS. En los resultados de las evaluaciones en la comparación del *FD* y la *FCV* al interior de los casos de estudio para la totalidad del área de la oficina con los rangos propuestos en esta tesis, existe una diferencia promedio anual del 1.4 % de mejora en la *FCV* para el CESTS, del 1.7 % para el CECD y del 1.4 % para el CECETS, y el CEEA; mientras que para el *FD* la mejora es del 0.5 % para el CESTS del 0.3 % para el CECD y del 0.6 % para el CECETS. En los resultados del área de trabajo con los rangos propuestos en esta tesis, existe una diferencia promedio anual del 6.3 % de mejora en la *FCV* para el CESTS, del 6.2 % para el CECD y del 6.0 % para el CECETS, y el CEEA; mientras que para el *FD* la mejora es del 0.5 % para el CESTS del 0.3 % para el CECD y del 0.6 % para el CECETS.

El comportamiento de la *FCV* conforme a los rangos establecidos por Sicurella *et al.* [33] $E_{LL} = 150 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 750 \text{ lx}$, para el interior del espacio se ve favorecida con una mejora promedio anual de 4.4 %, caso contrario a lo que ocurre conforme los rangos propuestos en esta tesis $E_{LL} = 300 \text{ lx}$ y $E_{UL} = 1500 \text{ lx}$, en donde la *FCV* se encuentra tres puntos porcentuales por debajo con un promedio anual de 1.4 %. Para el comportamiento de la *FCV* en el área de trabajo, se invierte el comportamiento presentando una mejora promedio anual de la *FCV* de 6.14 % conforme los rangos propuestos en esta tesis, y un 5.1 % conforme a los rangos propuestos por

Sicurella *et al.* [33]. Siendo el CESTS considerando el área de trabajo (AT) con los rangos propuesto en esta tesis para la *FCV*, la mejor opción con base en los resultados evaluados a partir de la metodología aplicada.

La tercera conclusión se enfoca en la parte de las evaluaciones donde ninguno de los índices revisados se puede tomar a priori como un único parámetro para decidir o representar el comportamiento de la iluminación natural de un espacio, ya que el confort lumínico y el desempeño térmico se ven afectados por diferentes factores. La última conclusión expone que ninguna de las propuestas mejora considerablemente el desempeño lumínico dado que el tubo solar es muy pequeño. El colocar un difusor evita la marca solar pero no mejora notablemente la iluminación al interior del espacio o de la zona de trabajo.

5.1. Propuesta de solución

Para mejorar los niveles de iluminación y el desempeño térmico al interior de la oficina de dirección del IER-UNAM se proponen dos opciones. La primera opción es sustituir el difusor existente del tubo solar instalado en la cubierta de la dirección del IER-UNAM, por un Difusor OptiView de la misma marca del fabricante, considerado como un difusor tecnológicamente superior por utilizar un lente de Fresnel y un doble acristalamiento, con el objetivo de hacer desaparecer las marcas de luz solar directa en forma de cruz que actualmente se presentan así como el desconfort lumínico por contraste. La segunda opción es crear una apertura en la cubierta sobre el área contigua al muro norte, y colocar un acrílico o vidrio que permita la transmisión de luz natural de forma difusa, favoreciendo el tercio superior del área de la oficina con un porcentaje mayor de la *FCV* y una iluminación homogénea.

5.2. Recomendaciones para futuros estudios

Para futuros estudios y complementar la investigación realizada en esta tesis se sugiere trabajar con modelos y simulaciones enfocados al análisis de la contribución de los vanos y/o ventanas tanto verticales como horizontales (domos o tragaluces), en los niveles de iluminación y ganancia de calor con elementos de control, y trabajar con niveles de contraste.

Otras posibilidades no exploradas en esta investigación son, el realizar evaluaciones de iluminación y desempeño térmico incluyendo, en los modelos y las simulaciones, la existencia de sensores tanto de iluminación natural como de presencia, que permitan regular los niveles de iluminación natural ya sea mediante atenuadores de luz natural (dimmers) o bien generar un sistema híbrido con el manejo de iluminación artificial, con el objetivo de mantener una iluminación homogénea en las áreas de trabajo. Se recomienda acotar los rangos utilizados en los parámetros con los cuales se evalúan las simulaciones, conforme lo establecen las normas y reglamentos según las tareas o actividades en las que apliquen.

Bibliografía

- [1] Sitio web de United Nations Environment Programme (UNEP). <http://www.unep.org/sbci/aboutsbci/background.asp>. *Sustainable Buildings and Climate Initiative*, consultado el 01 de diciembre de 2015.
- [2] Sitio web de United States Environmental Protection Agency (EPA). <http://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources/commercialresidential.html>. *Sources of Greenhouse Gas Emissions, Commercial and Residential Sector Emissions*, consultado el 01 de diciembre de 2015.
- [3] Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. Balance Nacional de Energía 2014, Secretaria de Energia, México 2015.
- [4] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía CONUEE. Guía para la iluminación eficiente en el hogar / La iluminación y el consumo de energía, 2011.
- [5] Secretaría de Energía SENER en colaboración con la Agencia Internacional de Energía AIE. Indicadores de Eficiencia Energética en México 2011.
- [6] Sitio web de EnergyPlus Weather Data by Region. http://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region.6/dnk%20%20documentation, consultado el 01 de febrero de 2015.
- [7] Secretaria de Energía. Norma Oficial Mexicana, NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envol-

- vente de edificios no residenciales. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2001.
- [8] Secretaria del Trabajo y Previsión Social. Norma Oficial Mexicana, NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2008.
- [9] A. Nazzal. A new evaluation method for daylight discomfort glare. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(4):295–306, 2005.
- [10] W. Kim y J. Kim. The Scope of the glare light source of the window with non-uniform luminance distribution. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Sustainable Healthy Buildings*, Seoul KR, 2010.
- [11] F. Cantin y M. Dubois. Daylighting metrics based on illuminance, distribution, glare and directivity. *Lighting Research and Technology*, 43(3):291–307, 2011.
- [12] C. Sapia. Daylighting in buildings; developments of sunlight addressing by optical fiber. *Solar Energy*, 89:113–121, 2013.
- [13] L. Bellia, A. Cesarano, G. Luliano, y G. Spada. Daylight glare: a review of discomfort indexes. *Visual Quality Energy Efficient Indoor Light*, 2008.
- [14] S. McColl y J. Veitch. Full-spectrum fluorescent lighting: a review of its effects on physiology and health. *Psychological Medicine*, 31(7):905–913, 2001.
- [15] Sitio web de Low Energy Architecture Research Unit (LEARN). http://new-learn.info/packages/tareb/docs/ecb/ecb_ch4_es.pdf/, consultado el 01 de julio de 2015.
- [16] Sitio web de Radiance. <http://www.radiance-online.org/learning/documentation>, consultado el 01 de febrero de 2015.
- [17] Sitio web de U. S. Department of Energy. Energy Plus, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, 2009.
- [18] Sitio web de Google. SketchUp, <http://nrel.github.io/openstudio-user-documentation/>, consultado el 01 de febrero de 2015.

- [19] Sitio web de National Renewable Energy Laboratory (NREL). OpenStudio, <https://www.openstudio.net/>, consultado el 01 de febrero de 2015.
- [20] M. Paroncini y B. Calcagni y F. Corvaro. Monitoring of a light-pipe System. *Solar Energy*, 81:1180–1186, 2007.
- [21] C. Ochoa y I. Capeluto. Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. *Building and Environment*, 41:1128–1135, 2006.
- [22] G. Barrios y G. Huelsz y J. Rojas y J. Ochoa y I. Marincic. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 50:120–127, 2012.
- [23] H. Danny. A review of daylight illuminance determinations and energy implications. *Applied Energy*, 87:2109–2118, 2010.
- [24] R. Perez y P. Ineichen y R. Seals. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5):271–289, 1990.
- [25] R. Pérez y R. Seals y J. Michalsky. All weather model for sky luminance distribution – preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3):235–245, 1993.
- [26] D. Bourgeois y C. Reinhart y G. Ward. Standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations. *Building and Research and Information*, 36(1):68–82, 2008.
- [27] C. Reinhart y J. Wienold. The daylighting dashboard a simulation-based design analysis for daylight spaces. *Building and Environment*, 46:386–396, 2011.
- [28] P. Tregenza y P. Waters. Daylight coefficients. *Lighting Research and Technology*, 15(2):67–71, 1983.
- [29] A. Christian y R. Toke y S. Svend. Simple tool to evaluate the impact of daylight on building energy consumption. *Solar Energy*, 82:787–798, 2008.

- [30] R. Leslie y L. Radetsky y A. Smith. Conceptual design metrics for daylighting. *Lighting Research and Technology*, 44:277–290, 2012.
- [31] M. Aries y M. Aarts y J. van Hoof y M. Eur. Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment. *Lighting Research and Technology*, 47:6–27, 2015.
- [32] S. Carlucci y F. Causone y F. De Rosa y L. Pagliano. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47:1016–1033, 2015.
- [33] F. Sicurella y G. Evola y E. Wurtz. A statical approach for the evaluation of thermal and visual comfort in free-running buildings. *Energy and Buildings*, 47:402–410, 2012.
- [34] D. Morillón. *Atlas del bioclima de México*. Investigación y Desarrollo. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, 2004.
- [35] C. Reinhart y O. Walkenhorst. Validation of dynamic Radiance-based daylight simulation for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33(7):683–697, 2001.
- [36] C. Reinhart y J. Mardaljevic y Z. Rogers. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, 3(1):7–31, 2006.
- [37] Z. Rogers y D. Goldman. *Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool - development report and case studies*. CHPS Daylighting Committee, Architectural Energy Corporation, Boulder, Colorado 2006.
- [38] A. Nabil y J. Mardaljevic. Useful daylight illuminance: a new paradigm to access daylight in buildings. *Light Research and Technology*, 37:41–59, 2005.
- [39] A. Nabil y J. Mardaljevic. Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38(7):905–913, 2006.

- [40] Sitio web de Biblioteca Digital. Ix Einstein y el efecto fotoeléctrico/
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/19/htm/sec_12.htm., consultado el 01 de septiembre de 2016.
- [41] Paul G. Hewitt. *Física Conceptual*. PEARSON, tercera edición edition, 1999.
- [42] Sitio web de Diccionario de Arquitectura y Construcción.
<http://www.parro.com.ar/definiciondeluzdifusa>., consultado el 01 de septiembre de 2016.
- [43] Sitio web de Hyper Physics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/vision/lumpow.html#c1>., consultado el 01 de septiembre de 2016. Luz y Visión, Radiometría y Fotometría.
- [44] Colombo Elisa y O'Donnell Beatriz. *Iluminación Eficiente*. Capítulo 2, Luz, Color y Visión. Proyecto ELI, 2002.
- [45] Juan Guasch Ferrás y Fernando Ramos Pérez y Ana Hernández Calleja. *Enciclopedia de la Organización Internacional del Trabajo, Capítulo 46 Iluminación*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2012.
- [46] Comisión Nacional de Vivienda CONAVI. *Criterios e indicadores para desarrollos habitacionales sustentables*. CONAVI, 2008.
- [47] Andrea Pattini. *Capítulo 11, Luz Natural e Iluminación de Interiores*. ASADES, 1994.
- [48] F. Serra y H. Coch. *Arquitectura y energía natural*. Universidad Politécnica de Catalunya. Politext 40, <http://ecocosas.com/wp-content/uploads/Biblioteca/Arquitectura/Arquitectura>
- [49] S. Szokolay. *Environmental Science Handbook for Architects and Builders*. The Construction Press, 1980.
- [50] C.A. Roule. *The role of ventilation. Natural ventilation in the urban environment*. C. Ghiaus and F. Allard, Earthscan, London 2005.
- [51] F. Tudela. *Ecodiseño*. Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco, 1982.

- [52] S. Carlucci y L. Pagliano. A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy and Buildings*, 53:194–205, 2012.
- [53] J. Mardaljevic y L. Heschong y E. Lee. Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research and Technology*, 41(3):261–283, 2009.
- [54] D. Bourgeois y C. Reinhart y G. Ward. Standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations. *Building Research and Information*, 36(1):68–82, 2008.
- [55] S. Olbina y Y. Beliveau. Developing a transparent shading device as a daylighting system. *Building Research and Information*, 37(2):148–163, 2009.
- [56] M. David y M. Donn y F. Garde y A. Lenoir. Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades. *Building and Environment*, 2011.
- [57] G. Barrios y G. Huelsz y R. Rechtman y J. Rojas. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. *Energy and Buildings*, 43:219–223, 2011.
- [58] Sitio web de U. S. Department of Energy. Energy Plus, Weather Data http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=DNK/cname=Denmark, consultado el 01 de marzo de 2015.
- [59] Sitio web de AEMC Instruments. <http://www.aemc.com/products/spanish%20pdfs/2121.21-sp.pdf>, consultado el 01 de septiembre de 2016. Medidores de Parámetros Ambientales, Luxómetro.
- [60] J.A. Duffie y W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2013.
- [61] E. Simá y M. A. Chagolla-Aranda y G. Huelsz y R. Tovar y G. Alvarez. Tree and neighboring buildings shading effects on the thermal performance of a house in a warm sub-humid climate. *Building Simulation*, 8:711–723, 2015.

- [62] Ing. Carlos Pearson. *Manual del Vidrio Plano*. CAVIPLAN, Cámara del Vidrio Plano y sus Manufacturas de la República Argentina. Pag.23.